

# Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen Anhang 2.2

 Fachliche Hintergrundinformationen –
 Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA







# Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen Anhang 2.2

Fachliche Hintergrundinformationen –
 Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA



#### **Impressum**

Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen – Anhang 2.2 Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA

#### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: (08 21) 90 71-0
Fax: (08 21) 90 71-55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

#### Bearbeitung/Text/Konzept:

Alexander Schwendner

LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH

Tillystraße 2 90431 Nürnberg

Tel.: (0911 655-5620 Fax: (0911) 655-5699 E-Mail: geo@lga.de www.lga-geo.de

#### Redaktion:

LfU Referat 95 "Altlasten, schädliche Bodenveränderungen"

#### Bildnachweis:

siehe Bildnachweis auf Seite 61

#### Stand:

September 2009

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

Zusam	menfassung	5
1	Einführung	8
2	Gesichtete Quellen	9
2.1	Entwicklung der Forschungsschwerpunkte in den USA	9
2.2	Das Projekt SERDP - ER-1155	10
3	Ergebnisse des SERDP -ER-1155-Projekts	13
3.1	Situation auf Schießbahnen im Medium Boden	13
3.1.1	Schadstoffverteilung	13
3.1.2	Sprengstoffkontaminationen	19
3.1.2.1	Handgranatenwurfstände	19
3.1.2.2	Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen	20
3.1.2.3	Artillerieschießbahnen	22
3.1.2.4	Bombenabwurfplätze	25
3.1.2.5	Sprengplätze	25
3.1.3	Pulverkontaminationen	26
3.1.4	Resümee	29
3.2	Kontamination von Sediment, Grund- und Oberflächenwasser auf Schießbahnen	30
3.2.1	Artillerie- und Bombenzielgebiete	30
3.2.1.1	Grundwasser	30
3.2.1.2	Oberflächengewässer	31
3.2.1.3	Ausgetrocknete Flussbetten und Drainagegräben	31
3.2.1.4	Explosionstrichter	32
3.2.2	Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen	32
3.2.2.1	Grundwasser	32
3.2.2.2	Oberflächengewässer	33
3.2.2.3	Explosionstrichter	33
3.2.3	Spreng- und Brandplätze	34
3.2.4	Resümee	34
3.3	Versuche zur Bestimmung der bei Sprengungen verbleibenden Rückstände	34

3.3.1	Rückstände von Kampfmitteln nach Verschuss	35
3.3.2	Rückstände von Schlagladungen	36
3.3.3	Rückstände nach Sprengung von Kampfmitteln	38
3.3.3.1	60 mm Wurfgranaten	38
3.3.3.2	81 mm Wurfgranaten	40
3.3.3.3	105 mm Sprenggranaten	41
3.3.3.4	155 mm Sprenggranaten	42
3.3.3.5	Minen	43
3.3.3.6	Bangalore-Torpedos	44
3.3.3.7	Handgranaten	44
3.3.4	Rückstände nach kontrollierter Low-Order-Sprengung	45
3.3.5	Resümee	45
3.4	Laborversuche im Rahmen des ER-1155-Projekts	47
3.4.1	Bestimmung der Transportparameter ausgewählter sprengstofftypischer Verbindungen	47
3.4.2	Säulenauslaugversuche	48
3.4.2.1	DRDC-Studie	48
3.4.2.2	ERDC-Studie	50
3.5	Folgerungen aus dem Projekt ER-1155	50
3.5.1	Charakterisierung der Rückstände auf Schießbahnen	50
3.5.2	Probenahme	51
3.5.3	Probenaufbereitung	52
3.5.4	Bodenkonzentrationen	52
3.5.5	Grund-/Oberflächenwasser, Sedimente	52
3.5.6	Vor-Ort-Sprengung	53
3.5.7	Transportparameter	53
3.5.8	Säulenversuche	53
4	Folgerungen aus dem Projekt ER-1155 für Sprengplätze	54
5	Fehlerbetrachtung	60

## Zusammenfassung

Zum Kontaminationsgeschehen bei der Vernichtung von Munition waren bisher eine Reihe grundlegender Fragen offen, die bei der Untersuchung eines Sprengplatzes und seiner Gefährdungsabschätzung von Bedeutung sind. Die Sichtung der amerikanischen **Literatur**, vorrangig die Auswertung einer aktuellen **Großstudie** der US-Armee über Rückstände von Sprengstofftypischen Verbindungen auf **Schießbahnen** und ihr weiteres Verhalten in der Umwelt konnte wesentliche Aspekte dieser Fragen klären.

Die umfangreichen US-Versuche haben ergeben, dass nur **minimale Rückstände** in der Größenordnung von 0,003% der Füllung (Ladung) verbleiben, wenn Munition nach Verschuss bestimmungsgemäß, d. h. "**high-order**" detoniert. Dies trifft mit Einschränkungen auch für das Sprengen von Blindgängern zu, wenn eine High-Order-Umsetzung gelingt. Bei einer unvollständigen "**Low-Order-Detonation**" ist jedoch mit sprengstoffgefüllten oder -behafteten Bruchstücken der Hülle sowie mit zahlreichen losen **Sprengstoffbruchstücken** zu rechnen. Der Hauptteil der Rückstände scheint sich in Form von feinen, organoleptisch nicht mehr erkenntlichen Partikeln (Mikrokristallen) im direkten Umfeld der Verpuffungsstelle niederzuschlagen. Nach US-Einschätzung können Low-Order-Detonationen auf Schießbahnen bei Fehlfunktion der verschossenen Munition, durch sekundäre Initiierung von Blindgängern durch Splitterflug und bei Sprengung von Blindgängern mit unterdimensionierten Schlagladungen entstehen.

Diese Ergebnisse sind für die Bewertung der Sprengplätze in Deutschland von Relevanz, da auch für die **deutschen Massensprengungen** nach dem 2. Weltkrieg von einem sehr hohen Anteil an Low-Order-Umsetzungen auszugehen ist:

- Die damaligen Schlagladungen reichten oft nicht aus, die vorbereiteten Stapel vollständig umzusetzen. Dies wird durch die hohen Blindgängerraten belegt, die mit hohen Raten an Low-Order-Umsetzungen einhergegangen sein dürften.
- Blindgänger, die bei der Sprengung in den Trichteruntergrund gedrückt worden sind, wurden wahrscheinlich durch wiederholte Nutzung der Sprengtrichter sekundär durch Splitter, hohe Temperaturen oder Druckwellen initiiert und hierbei zu erheblichen Anteilen vermutlich nur loworder umgesetzt.
- Viele der Sprengstoffe waren mit Salzen gestreckt. Daneben war durch die Produktion unter Kriegsbedingungen die Qualität der Sprengstoffe nicht optimal. Niedrigere Detonationsgeschwindigkeiten und geringere Umsetzungsraten waren die Folge.
- Der früher standardmäßig als Schlagladung verwendete lose Sprengstoff (TNT) war (durch längere Lagerung oder durch die Form der Wiedergewinnung) nicht immer in einwandfreiem Zustand. Oft musste auch "altes" TNT einfach "entsorgt" werden. Lose Sprengstoffe hinterlassen – wie die US-Untersuchungen ergaben – deutlich mehr Rückstände als eingehüllte.
- Der Anteil an sprengstoffgefüllter Kleinmunition war auf vielen Nachkriegssprengplätzen hoch. Kleinmunition hinterlässt wie US-Untersuchungen andeuten mehr Rückstände als großkalibrige.

Aus diesen Gründen ist anzunehmen, dass der "Rückstandswert" von 0,003 % der Füllmenge, den die US-Armee aus allen Einzel-Sprengungen errechnet hat, für die Nachkriegssprengplätze als Bilanzierungsfaktor zu niedrig ist. Ein "Rückstandswert" von 4 %, der in Fachkreisen bisher oft genannt wird, erscheint auf der anderen Seite jedoch deutlich zu hoch. Die auf Sprengplätzen

bisher nachgewiesenen Bodenkontaminationen sind für einen Wert von 4 % Rückstand deutlich zu niedrig. Daher erscheint ein Wertebereich zwischen **0,01 und 1** % für die Berechnung des Emissionspotenzials (aus der Sprengbilanz) als realistisch. Im Standardfall können 0,1 % angesetzt werden.

Aus den amerikanischen (Einzel-)Sprengversuchen (sowie aus eigenen Beobachtungen) ist abzuleiten, dass sich auf einem "durchschnittlichen Nachkriegsprengplatz" die Sprengstoffrückstände mit dem **Auswurf** bis in etwa 20 m Entfernung vom Trichterrand bzw. vom Rand des Sprengfelds konzentrieren. Eine Zonierung im Sinne einer Zu- oder Abnahme der Konzentrationen mit zunehmender Entfernung ist vermutlich nicht gegeben. Bei größeren Trichtern kann auch der kontaminierte Bereich größer sein. Hier ist eine zweite Probenahmezone von 20 bis 50 m ab Trichterrand zu empfehlen.

Gemäß US-Studie verbleiben auch bei der bestimmungsgemäßen Anwendung von **Pulver** Rückstände in beträchtlichem Ausmaß. Sie liegen in Form von teilverbrannten oder unverbrannten Pulverpartikeln vor. Elutionstests konnten zeigen, dass relevante Zusatzstoffe wie Nitroglycerin und 2,4-DNT, wenn sie an Pulverpartikel (Nitrocellulose) gebunden vorliegen, sehr wenig löslich sind. Auch auf deutschen Nachkriegssprengplätzen wurden zum Teil Kartuschen, patronierte Munition oder Infanteriemunition zusammen mit großkalibriger Munition vernichtet. Es ist sehr wahrscheinlich, dass bei einer Sprengung dieser Pulver-haltigen Kampfmittel ebenfalls Rückstände in höherer Größenordnung verblieben sind. Auch hier ist anzunehmen, dass ein wesentlicher Teil in Partikelform vorliegt.

Die pulvertypischen Verbindungen Nitroglycerin (NG) und 2,4-DNT sind im Rahmen der Gefährdungsabschätzung zu berücksichtigen. Ergänzende Informationen können mittels Eluatuntersuchungen erhalten werden.

Das weitere **Verhalten der Explosivstoffe** in der Umwelt wird im Wesentlichen durch Lösung, Bindung (der gelösten Stoffe) an Böden bzw. Sediment und Abbau bzw. Umwandlung der in Lösung befindlichen Stoffe charakterisiert. Die US-Untersuchungen ergaben, dass die ablaufenden Prozesse sehr **komplex** sind und sowohl von der Sprengstoffart als auch vom Bodentyp abhängen. Generell binden Sprengstofftypische Verbindungen **wenig an Böden**, ein gewisser Rückhalt ist jedoch bei hohen Tonmineralgehalten und / oder größeren Anteilen an organischer Matrix gegeben. RDX (Hexogen) zeigte hierbei von allen Sprengstofftypischen Verbindungen generell das geringste Bindungsvermögen bzw. die höchste Mobilität. Die Ergebnisse der Versuche werden aus Gründen der Übersichtlichkeit im Anhang 3.4 Hinweise zu Stoffdaten zusammengestellt.

Die US-Versuche zeigten weiterhin, dass in Lösung gegangenes **TNT** bei manchen Böden biotisch / abiotisch um- und/oder abgebaut und nachfolgend irreversibel gebunden werden kann. Die Abbauraten lagen für TNT unter anaeroben Bedingungen generell höher. Ab-/Umbau und Bindung kann bei TNT offensichtlich eine wichtige Rolle spielen. Dies stimmt mit den US-Geländebefunden überein, nach denen Grundwasserschäden durch diese Substanz auf Schießbahnen bisher eher selten beobachtet wurden.

Für **RDX** ist insbesondere unter anaeroben Bedingungen ebenfalls ein Abbau bekannt, der bis zur Ringspaltung und Mineralisierung führen kann, jedoch scheint dieser Mechanismus im Regelfall nicht dominant zu sein. Säulenversuche aus der US-Studie deuten insgesamt auf ein hohes Gefährdungspotenzial durch diesen Sprengstoff hin. Die deutlichen Unterschiede von TNT und RDX im stofflichen Umweltverhalten erklären, warum auf Schießbahnen, auf denen

Composition B (Mischung aus TNT und RDX) gefüllte Munition verwendet wird, häufig nur RDX im Grundwasser anzutreffen ist. Auch im Grundwasser deutscher Nachkriegssprengplätze ist oft Hexogen nachweisbar. Die Quelle des Hexogens ist hier nicht vollständig geklärt, da Hexogen als "edler" und teurer Sprengstoff in Deutschland nur in Munition für Spezialzwecke verfüllt wurde.

Die US-Studie betont, dass Sprengstoffrückstände auf Schießbahnen sehr heterogen verteilt und mit Standardbeprobungsverfahren nicht verlässlich zu erkunden sind. Entsprechend dieser Studie sind nur Mischproben aus Vielfach-Einzelproben und spezielle Probenvorbereitungen (Mahlen des Probenguts) in der Lage, belastbare Ergebnisse zu liefern. Dieses Verfahren stößt bei der Erkundung von Low-Order-Detonierern mit extrem heterogener Schadstoffverteilung jedoch an seine Grenzen. Hier wurden keine ausreichend belastbaren Ergebnisse erzielt.

Deutsche Nachkriegssprengplätze sind ebenfalls durch eine extrem heterogene Schadstoffverteilung gekennzeichnet, die dem Low-Order-Szenario vermutlich sehr ähnelt. Die im Rahmen des LfU-Projekts erstellte "Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen" kommt zu dem Schluss, dass die Bestimmung des durchschnittlichen Sprengstoffgehalts eines Trichters in reproduzierbarer Form verfahrenstechnisch nicht möglich ist. Die Beurteilung des Gefährdungspotenzials konzentriert sich daher auf die Bestimmung der mobilisierbaren Anteile.

### 1 Einführung

Bei der Vernichtung von Munition ist bisher eine Reihe grundlegender Fragen zum Kontaminationsgeschehen ungeklärt, die bei der Untersuchung von Sprengplätzen und deren Gefährdungsabschätzung von großer Bedeutung sind:

- > Verbleiben bei einer Sprengung generell Rückstände der Füllung?
- > Wie hoch ist der Anteil des nicht umgesetzten Sprengstoffs?
- > Von welchen Randbedingungen z. B. Art oder Güte des Sprengstoffs, Munitionstyp, Kaliber, oder verwendetem Sprengmittel hängt dieser Anteil ab?
- > Wie verteilen sich die Rückstände des Sprengstoffs im Gelände? Bis in welche Entfernung um die Explosionsstelle sind Sprengstoffe nachweisbar?
- > In welcher Form bzw. Korngröße liegen die Rückstände vor?
- >> Bilden sich andere umweltrelevante Detonationsprodukte?
- ➤ Sind die Verhältnisse bei der "Sprengung von Munition" auf die Sprengung bzw. Deflagration¹ von Treibmitteln übertragbar?

In der Phase der Konzeptionierung der Arbeitshilfe war im Hinblick auf die Fragestellungen zunächst zu verschiedenen relevanten Stellen in Deutschland Kontakt aufgenommen worden (Bundeswehr, OFD Hannover, BICT/WIWEB, Kampfmittelräumdienste der Länder u. a.). Die Räumdienste konnten wichtige Informationen zu den munitions- und vernichtungstechnischen Aspekten auf Massenvernichtungsplätzen beitragen. Die Ergebnisse sind im **Anhang 2.1** "Erfahrungen bei der Sprengplatzbearbeitung in Deutschland" zusammengefasst. Mit umwelttechnischen Fragestellungen hatten sich die Feuerwerker jedoch nur ansatzweise befasst. Bei den übrigen genannten Stellen lagen keine verwertbaren Informationen vor.

Einige Universitäten in Deutschland haben sich mit ähnlichen Fragestellungen beschäftigt z. B. TU Berlin Li & SCHNEIDER 1993 [258]; Uni Mainz LOOK 2001 [206], Uni Braunschweig DURNER 2002 [239], allerdings sind viele dieser Arbeiten oft nicht publiziert oder in wenig bekannten Spezialzeitschriften erschienen.

Bei Recherchen im Zuge der Vorbereitung der Arbeitshilfe stellte sich heraus, dass sich die US-Armee ab Ende der 90er Jahre sehr intensiv mit den Umweltauswirkungen des übungstechnischen Einsatzes von Munition zu beschäftigen begann. Fast alle Berichte sind uneingeschränkt freigegeben und im Netz publiziert. Die Titel der Arbeiten ließen erkennen, dass auch viele der eingangs angeschnittenen Fragestellungen behandelt worden sind. Der vorliegende Teilbericht der Arbeitshilfe sichtet und interpretiert diese Ergebnisse hinsichtlich der Fragestellung "Umweltauswirkungen durch Massensprengung von Munition" und vergleicht sie mit den Ergebnissen, die die Auswertung der Gutachten zu Sprengplätzen ergeben hat (Anhang 2.1 "Erfahrungen bei der Sprengplatzbearbeitung in Deutschland"). Hierbei ergaben sich viele Parallelen, insbesondere bezüglich der Heterogenität der Schadstoffverteilung und der daraus abzuleitenden Probenahmestrategien. Sofern sinnvoll bzw. als notwendig erachtet, werden die US-Ergebnisse in einem Subtext kommentiert.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Liegt die Geschwindigkeit der Stoßwelle bei der chemischen Umsetzung unter 1.500 m/s so spricht man von einer Deflagration, darüber von einer Detonation..

#### 2 Gesichtete Quellen

#### 2.1 Entwicklung der Forschungsschwerpunkte in den USA

Warum hat sich die US-Armee ab Ende der 90er Jahre so intensiv mit den Umweltauswirkungen beim übungstechnischen Einsatz von Munition bzw. mit dem Kontaminationspotenzial von Schießbahnen beschäftigt? Um dies zu verstehen, ist ein kurzer Rückblick notwendig:

Die Standorttypen, die Ende der 70er Jahre zuerst untersucht wurden, waren *Army Depots*. Diese staatlichen Stellen, die privatwirtschaftlich betrieben werden [398], dienen in den USA zur **Herstellung** und **Verfüllung** von militärischen Sprengstoffen. Wie auf den deutschen Standorten der Sprengstoffherstellung des 2. Weltkriegs (z. B: *Stadtallendorf, Hessisch Lichtenau, Clausthal-Zellerfeld, Elsnig-Torgau*) waren auch auf vielen amerikanischen Depots entsprechende Kontaminationen fest zu stellen [256].

Anfang der 80er Jahre rückten erstmals die **Munitionsvernichtungsplätze** (OB/OD Sites = Open Burning / Open Detonation) in das Umweltbewusstsein des amerikanischen Militärs. So stellten HOWES et al. 1982 [**249**] erstmals unter wissenschaftlichem Ansatz fest, dass bei der Sprengung eines Kampfmittels der Sprengstoffumsatz nicht vollständig verläuft, sondern Rückstände verbleiben und neben Ruß auch beachtliche Mengen an Benzol und Toluol freigesetzt werden. Untersuchungen von JENNESS im Jahr 1983 ergaben[zitiert nach **256**], dass bei der Verbrennung von Munition für Handfeuerwaffen in einem Drehrohrofen zwischen 20 und 25 % der gesamten Beschickungsmenge in Form von Partikelstaub emittiert werden. ROSAK et JAKOBS [zitiert nach **256**] bestimmten zur gleichen Zeit die chemische Zusammensetzung der Zyklon- und Filterstäube von Ausbrennöfen der US-Armee. Sie bestätigten die Ergebnisse von JENESS: Beim Ausbrennen von Munition entstehen Gase bzw. Stäube, die massiv mit Schwermetallen (Blei, Cadmium, Arsen, Barium) belastet sind. Auch die Ascherückstände enthalten durchschnittlich 44 mg/kg an PAK und bis zu 185 mg/kg an 2,4-DNT bzw. 16 mg/kg an TNT.

1984 untersuchte NEWELL erstmals systematisch Bodenrückstände auf modernen US-Sprengplätzen [268]. LAYTON et al. werteten diese Ergebnisse zwei Jahre später detailliert aus und kamen zu dem Schluss, dass bei einer Detonation (durch Sprengung) etwa 4% der Füllung nicht umgesetzt werden [256]. Des Weiteren ergab die Sichtung der bis dato vorliegende Literatur zu Umweltauswirkungen bei der Munitionsvernichtung durch Sprengen, offenen Abbrand und Verbrennung in einem Ofen, dass DNT, TNT, RDX und deren Abbauprodukte sowie Dibutylphthalat, Diphenylamin, HMX und Tetryl als relevante Schadstoffparameter des Spreng-Szenarios auftreten.

Zusammenfassend war Mitte der 80er Jahre deutlich geworden, dass nicht nur bei der Herstellung und Abfüllung von Sprengstoffen in den Depots sondern auch bei der Vernichtung der Munition auf den OB/OD-Sites gravierende Umweltbeeinträchtigungen zu erwarten waren. Erste Berechnungen ergaben, dass für den Fall der Sanierung der Depots sowie der kontaminierten Vernichtungsstandorte die damals noch übliche Praxis der Ablagerung sprengstoffbelasteter Böden auf Deponien weder aus finanziellen noch aus Kapazitäts-Gründen umgesetzt werden kann.

In den 90er Jahren beschäftigte sich die US-Armee deshalb sehr intensiv mit **Sanierungsverfahren** [98, 99, 133, 135, 138, 139, 141, 145, 154, 234, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422]. Die Literaturquellen bzw. die Titel lassen erkennen, dass ein Schwerpunkt auf alternativen Sanierungsverfahren lag.

Ab 1998 wandte sich die US-Armee dann verstärkt den Umweltauswirkungen auf Übungsplätzen bzw. den **Schießbahnen** zu. Neben "Produktion/ Abfüllung" und "Vernichtung" war der übungstechnische "Einsatz" das letzte noch nicht untersuchte kontaminationsrelevante Szenario. Dies hatte einen be-

#### sonderen Hintergrund:

Mitte der 90er Jahre wurden auf dem *MMR*-Übungsplatz (*Massachusetts Military Reservation*) Grundwasserverunreinigungen durch Sprengstofftypische Verbindungen (im Wesentlichen Hexogen und Perchlorat) bekannt. Auf Veranlassung der US-EPA wurde 1997 der Schießbahnbetrieb eingestellt. Erkundungen sollten zunächst den Eintragsherd ermitteln. Im Jahr 2000 ergänzte die EPA ihre Forderungen: Es sollten Maßnahmen ergriffen werden, die zu einer Reduzierung der Gefahr für die Öffentlichkeit führten [208].

#### 2.2 Das Projekt SERDP - ER-1155

Zu Beginn des Projekts waren jedoch die grundlegenden Zusammenhänge von Schießbahnen bzw. die damit verbundenen Kontaminationsquellen nicht bekannt, um tatsächlich effektive bzw. gezielte Gegenmaßnahmen auf dem *MMR* treffen zu können. Vom *Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP) des DoD* (Departement of Defence / Verteidigungsministerium) wurde daraufhin im Jahr 2000 unter dem Projekttitel *SERDP - ER-1155*<sup>2</sup> *Distribution and Fate of Energetics on DoD Test and Training Ranges* eine umfassende Studie gestartet. Detaillierte Informationen finden sich unter http://www.serdp.org/Research/er-energetics.cfm. Die ER-1155-Studie verfolgte drei Hauptziele [208, 389]:

- > Charakterisierung der Sprengstoffkontaminationen auf aktuell genutzten Schießbahnen
- Bestimmung der Sprengstoffrückstände, die bei den drei typischen Szenarien entstehen: bei der (bestimmungsgemäßen) High-Order-Umsetzung von Munition nach Verschuss, bei der unvollständigen Detonation nach Verschuss (low-order) oder beim Sprengen von Blindgängern (BiP / blown in place practice).
- > Charakterisierung des Umweltverhaltens von Sprengstofftypischen Verbindungen, um fundierte Grundwassermodelle oder Gefährdungsabschätzungen vornehmen zu können.

Zunächst wurde der verfügbare **Kenntnisstand** über Schießbahnen eruiert, indem alle dato vorliegenden (unsystematisch erstellten) Berichte über Kontaminationen auf Schießbahnen in den USA und in Kanada ausgewertet wurden. Die Zusammenarbeit mit dem kanadischen *Defence Research & Development Center* hatte sich hierbei als vorteilhaft erwiesen, da auf den kanadischen Standorten vielfach auch Untersuchungen von Grund- und Oberflächengewässern durchgeführt worden waren. Diese Medien waren in den USA bisher wenig berücksichtigt worden.

Um die gewonnenen Kenntnisse zu vervollständigen bzw. Informationslücken zu schließen wurde ergänzend der **Belastungsgrad auf 27 Liegenschaften** in Kanada und den USA erkundet. Hierbei wurden verschiedene Übungsszenarios wie "Handgranatenwurfstand", "Gewehrgranatenschießstand", "Schießbahn für Panzerabwehrwaffen" (Abschuss- und Zielgebiete), "Wurf- und Artilleriegranatenschießbahn" (Abschuss- und Zielgebiete), "Sprengplatz", "Fliegerschießplatz" (für Hubschrauber) und "Bombenabwurfplatz" berücksichtigt. Bei allen untersuchten Standorten handelte es sich um live-fire-Einrichtungen, d. h. hier wurde mit sprengstoffgefüllter "Gefechtsmunition" (und nicht mit blind- oder teilgeladener Übungsmunition) geübt.

Die ersten Untersuchungen deuteten darauf hin, dass mengenmäßig der Hauptteil der Rückstände bei Low-Order-Umsetzungen von Munition gebildet wird. Um diesen Verdacht systematisch abzuklären, erweiterte man das *ER-1155-Projekt* und untersuchte erstmals systematisch die **Bildung von Explosivstoffrückständen**, sowohl nach bestimmungsgemäßem Einsatz (Verschuss) als auch nach nicht

\_

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> z. T. wird auch die Abkürzung CP1155 verwendet.

bestimmungsgemäßem Einsatz (Sprengung, Abbrand von Munition). Hierbei fanden sowohl Sprengstoff- als auch Pulverrückstände Berücksichtigung [105, 108, 109, 111, 116, 119, 127, 128, 210, 211 u. a.].

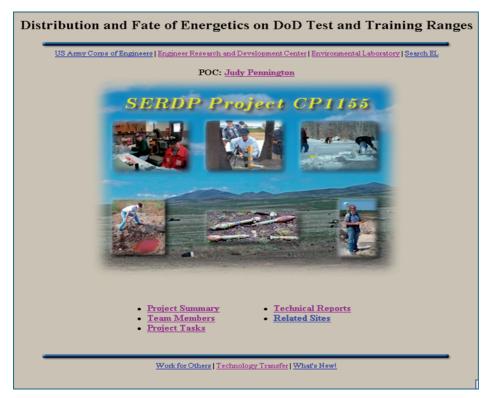


Abb. 1: Internetauftritt des SERDP ER-1155.

Zum Umwelt- bzw. Ausbreitungsverhalten von Sprengstoffen lagen damals ebenfalls erst wenige Kenntnisse vor. Teil der ER-1155-Studie bildeten daher grundlegende Versuche zu Lösungs-, Abbau- und Transportverhalten, um belastbare Daten für Gefährdungsabschätzungen zu erhalten (z. B. **145**, **146**, **151**, **152**, **155**, **156**, **158**, **159**, **160**].

Die Ergebnisse sollten nicht nur in einem Handlungskonzept für den *MMR* enden (erschienen 2005 [**423**]). Sie sollten vielmehr ermöglichen, geeignete und umweltgerechte Kontrollmaßnahmen auf US-Übungseinrichtungen zu installieren.

Der **abschließende Bericht** zu diesem Großprojekt erschien im Jahr 2006 [**208**]. An der Erstellung hatten neben dem *Environmental Laboratory* (J. C. PENNINGTON) und dem *Cold Regions Research and Engineering Laboratory* (Th. F. JENKINS) auch die Kanadische Forschungseinrichtung "*Defence Research and Development Canada* – Valcartier (G. AMPLEMAN, S. THIBOUTOT u. a.) sowie die Militärakademie in West Point (J. C. LYNCH) mitgewirkt.





Abb. 2: Logo des EL.

Abb. 3: Logo des CRREL.

Das CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory) mit Sitz in Hanover (New Hampshire) ist eines von sieben Forschungseinrichtungen der US-Armee, die seit 1998 unter dem Dach des Engineer Research and Development Center (ERDC) des US Army Corps of Engineers (USACE) zusammengefasst sind. Es beschäftigt sich mit verschiedensten militärtechnischen Fragestellungen.

Das *Environmental Laboratory* (*EL*) mit Sitz in Vicksburg, Massachusetts, gehört seit einiger Zeit ebenfalls zum *ERDC*, beschäftigt sich jedoch ausschließlich mit militärrelevanten Umweltthemen. Informationen zum Projekt ER-1155 sowie alle Berichte sind über den Link <a href="http://el.erdc.usace.army.mil/serdp/index.html">http://el.erdc.usace.army.mil/serdp/index.html</a> abzurufen [390].

Der aktuelle Endbericht von 2006 gibt eine umfängliche Zusammenfassung des derzeitigen Wissens in den USA und Kanada zu diesem Thema und bildet für den vorliegenden Teilbericht "Kenntnisstand in den USA" die vorrangige Grundlage. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der Fragestellungen, die im Rahmen des ER-1155-Großprojekts geklärt wurden.

### 3 Ergebnisse des SERDP -ER-1155-Projekts

#### 3.1 Situation auf Schießbahnen im Medium Boden

#### 3.1.1 Schadstoffverteilung

Auf nahezu allen 27 Standorten, die im Rahmen des *SERDP - ER-1155* exemplarisch überprüft worden sind, zeigte sich, dass die Rückstände in den Zielgebieten bzw. den Umsetzungsbereichen von Munition fast immer in den obersten wenigen cm des Bodenprofils zu finden waren.

Die Beschränkung des Schadstoff-Vorkommens bei Schießbahnen auf den oberflächennahen Bereich kann weitgehend auf den Auswurfbereich der Sprengtrichter auf deutschen Massenvernichtungsplätzen übertragen werden. D. h. auch hier ist davon auszugehen, dass die Rückstände (zunächst) auf der Geländeoberfläche abgelagert worden sind. Allerdings bildete sich bei den Massensprengungen deutlich mehr Auswurf, als bei der Detonation einzelner (US-)-Kampfmittel. Natürlich überprägte die Wiederverfüllung der Trichter, die im Regelfall nach Beendigung der Sprengarbeiten erfolgte, diese ursprüngliche Verteilung. Reste des Auswurfs können jedoch verblieben sein. Wie auf den US-Schießbahnen sind diese Verunreinigungen auf den oberflächennahen Bereich beschränkt. Ein Probenahmehorizont von 0 - 1,0 m, der bei Erkundungen deutscher Standorte oft gewählt wurde, liefert daher auf Grund der damit verbundenen hohen Verdünnung kein aussagefähiges Ergebnis.

Tab. 1: Fragestellungen, die im Rahmen des ER-1155-Großprojekts bearbeitet wurden. Gekürzt nach [123].

Distribution of Energetic Residues on the Surface Soil of Various Types of Ranges	Durchgeführte Studien			
Impact Areas				
Distribution and concentrations of HMX and TNT at anti-tank rocket range impact areas	ERDC TR-02-8; ERDC TR-03-2, ERDC/CRREL TR-04-7, ERDC TR-04-4, DRDC TR 2003-152, DRDC TR 2003-208, MMR-1903, ERDC TR-05-10, Chemosphere 2006, Environmental Forensics 2005			
Distribution and concentrations of RDX and TNT at hand grenade ranges	ERDC/CRREL TR-01-5, ERDC TR-01-13, ERDC TR-03- 2, ERDC TR-04-4, DRDC TR 2003-152, DRDC- TR 2004-205, ERDC TR-05-10, Chemosphere 2006			
Distribution and concentrations of residues of energetic compounds at artillery range impact areas	ERDC/CRREL TR-01-5, ERDC TR-01-13, ERDC TR-02-8, ERDC TR-04-4, DRDC TR 2003-152, MMR-4217, MMR-3915, MMR-3439, DRDC TR 2004-205, DRDC TR 2004-206, Environmental Forensics 2005			
Distribution and concentrations of residues of energetic compounds at Air Force bombing ranges, missile ranges, and rocket ranges	DRDC TR-2003-208, DRDC TR-2004-204, ERDC / CRRELTR-04-14, ERDC / CRRELTR-06-2			
Distribution and concentrations of residues of energetic compounds at naval air ground ranges	ERDC/CRREL TR-05-7			
Firing Points				
Distribution and concentrations of propellants at antitank rocket range firing points	ERDC TR-02-8, ERDC/CRREL TR-04-7, ERDC TR-03-2, ERDC TR-04-4, DRDC TR 2003-152, DRDC TR 2003-208, DMMR-1903, ERDC TR-05-10, DRDC- TR 2004-205, Environmental Forensics 2005			
Distribution and concentrations of propellant residues at artillery and mortar range firing points	ERDC/CRREL TR-01-5, ERDC TR-01-13, ERDC TR-02-8, ERDC/CRREL TR-04-3, ERDC TR-04-4, DRDC TR 2003-152, DRDC TR-2004-205, MMR-4342, ERDC TR-05-10, ERDC / CRRELTR-04-14, DRDC TM 2005-248			

Demolition Ranges			
Distribution and concentrations of residues of energetic compounds at demolition ranges	ERDC TR-04-4, Draft MMR Link report, MMR-8830, ERDC TR-03-2, MMR-4158, ERDC TR-05-10, ERDC/CRREL TR-06-2		
Sampling Considerations when Characterizing Distribution of Residues on Firing Ranges	Durchgeführte Studien		
Sampling Approaches and Protocols			
Sampling strategies to obtain representative surface soil samples at antitank rocket ranges	CRREL Special Report 98-9, ERDC TR-02-8, ERDC/CRREL TR-04-7, Environmental Forensics 2005		
Sampling strategy to obtain representative surface soil samples at hand grenade ranges	ERDC/CRREL TR-01-5, ERDC TR-01-13, ERDC TR-03- 2, ERDC/CRREL TR-03-16, ERDC TR-04-4		
Sampling strategy to characterize the firing points at artillery/mortar ranges	ERDC/CRREL TR-01-15, DRDC TR 2003-152, ERDC7CRREL TR 05-7, Environmental Forensics 2005, DRDC TM 2005-248		
Sampling strategies to characterize the impact areas at artillery/mortar ranges and Air Force bombing ranges	ERDC/CRREL TR-04-14, ERDC/CRREL TR-05-7, Environmental Forensics 2005, DRDC TR-2004-205, DRDC TR-2003-152, DRDC TR-2004-204, DRDC TR- 2003-205		
Sampling strategies to characterize explosives contaminated soil	http://www.emguidelines.org/, FATE Encyclopedia, http://clu-in.org, Environmental Forensics 2005		
Sample Processing			
Particle size distribution of energetic residues present in surface soil samples from training ranges	FATE Encyclopedia, www.ttclients.com /encyclopedia, ERDC TR-04-4, ERDC/CRREL TR 05-6		
Strategies to maintain representativeness of energetic residues in multi increment samples	Chemosphere 49: 1267- 1273 (2003), ERDC/CRREL TR-01-15, FATE Encyclopedia, <a href="http://clu-in.org">http://clu-in.org</a>		
	ERDC /CRREL TR-05-6, Chemosphere 2006		
Analytical			
Analytes not included in the standard EPA Method 8330	Studien zu Analyseverfahren waren nicht Bestandteil des ER - 1155		
Method confirmation	Studien zu Analyseverfahren waren nicht Bestandteil des ER - 1155		
Residues Associated with Specific Firing Events	Durchgeführte Studien		
Residues from High-Order Detonation of Fired Rounds			
Mass of unconsumed RDX and TNT from the live- fire detonation of Composition B high explosive (HE) 40-mm rifle grenades	ERDC/CRREL TR-03-16, ERDC TR-04-4, Chemosphere 2005		
Mass of unconsumed RDX and TNT from the live- fire detonation of Composition B HE M67 hand grenades	ERDC/CRREL TR-03-16, ERDC TR-04-4, Chemosphere 2005		
Mass of unconsumed RDX and TNT from the live- fire detonation of Composition B HE 60- mm mortar	Thermochimica Acta 2002, ERDC/CRREL TR-03-16, ERDC TR-04-4, Chemosphere 2005		
Mass of unconsumed RDX and TNT from the live- fire detonation of Composition B HE 81- mm mortar	ERDC/CRREL TR-03-16, ERDC TR-04-4; Chemosphere 2005		

Mass of unconsumed RDX and TNT from the live- fire detonation of Composition B HE 120- mm mortar	ERDC/CRREL TR-03-16, ERDC TR-04-4; ERDC7CRRL TR -05-15			
Mass of unconsumed RDX and TNT from the live- fire detonation of Composition B HE 105- mm howitzer round	ERDC/CRREL TR-03-16, ERDC TR-04-4, Chemosphere 2005			
Mass of unconsumed RDX and TNT from the live- fire detonation of Composition B HE 155- mm howitzer round	ERDC7CRRL TR -05-14			
Mass of unconsumed TNT from the live-fire detonation of TNT HE 155-mm howitzer round	ERDC7CRRL TR -05-14			
Residues from Blow-in-Place Demolition of Specific Munitions				
Mass of unconsumed RDX from the EOD detonation of a 1.25-lb block of C4	ERDC/CRREL TR-03-16, ERDC TR-04-4			
Mass of unconsumed RDX and TNT from the EOD detonation of 81-mm Composition B filled mortar with a 1.25- lb block of C4	ERDC/CRREL TR-05-8			
Mass of unconsumed RDX and TNT from the EOD detonation of Comp. B HE 105-mm howitzer round with a 1.25-lb block of C4	ERDC/CRREL TR-05-8			
Mass of unconsumed RDX and TNT from the EOD detonation of Comp. B HE 155-mm howitzer round with a 1.25- lb block of C4	ERDC/CRREL TR-05-8			
Mass of unconsumed RDX and TNT from the EOD detonation of TNT HE 155-mm howitzer round with a 1.25-lb block of C4	ERDC/CRREL TR-05-8			
Residues associated with blow-in-place demolition of UXO	Alaska studies are reported in Chapter 8 of this report; Redstone studies are leveraged, with Army EQI funds and will be completed in FY2005			
Optimal secondary charge for BIP of heavy artillery rounds and mortars to minimize residues	Will be reported in FY2006/07, under EQI funds.			
Residues Associated with Low-Order Detonation	ns of Specific Munitions			
Mass and particle size distribution of residues from low-order detonations of heavy artillery munitions	ERDC TR-03-2, ERDC TR-05-2 Chapter 3, ERDC TR-05-10, Chapter 8			
Residues Associated with Unconfined Charge				
Residues associated with blow-in-place demolition of unconfined UXO	DRDC TR-2003-370, ERDC TR-04-4, Chapter 7			
Residues Generated by Sympathetic Detonations				
The contribution of sympathetic detonation to explosive source term on range	ERDC TR-04-4, Chapter 7			
Fate and Transport Processes of Energetic Residues	Durchgeführte Studien			
Soil/Water Partitioning Process Descriptors				
Adsorption coefficients, i.e., Kds, and transformation rates for primary high explosives	ERDC TR-01-13, ERDC TR-02-10, Pennington and Brannon (2002), ERDC TR-03-02			
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•			

Zur Erkundung der durchschnittlichen Belastung eines bestimmten Bereichs stellte sich die Entnahme von *multi (increment) samples* (Mischprobe aus vielen Einzelproben) als essenziell heraus. Die Autoren weisen eindringlich darauf hin, dass nur diese Art der Probenahme bei der gegebenen extrem heterogenen räumlichen Verteilung der Rückstände aller Arten von Explosivstoffen repräsentative Proben liefert. Die Anzahl der zur Mischprobenbildung erforderlichen Einzelentnahmepunkte, die erforderlich war, um die durchschnittliche Konzentration belastbar abzuschätzen, hing von der Natur der Rückstandsablagerung und der Größe des Verdachtsbereichs ab, der zu erkunden war. Generell wurden bei einer Fläche von 100 m² 30 bis 50 Einzelproben für Bodenmischproben als geeignet eingestuft, bei einer Fläche von 10.000 m² steigt die Anforderung auf 50 - 100 Einzelproben.

Auf die extrem heterogene Schadstoffverteilung auf Schießbahnen hatten bereits Anfang der 90er Jahre verschiedene Autoren hingewiesen [87, 88, 424].

Der Begriff "multi (increment) sample" bedeutet "Mischprobe aus vielen Einzelproben". Da die Heterogenität der Sprengstoffrückstände auf Schießbahnen ohne Einschränkungen auch auf Massensprengplätze übertragbar ist, sind sowohl bei der Beprobung eines Auswurfbereichs als auch eines rückverfüllten Trichters mindestens 50 bis 100 Einzelproben erforderlich, um eine ausreichend hohe Repräsentativität zu erreichen. Wie die Auswertung der deutschen Gutachten ergeben hat, hatten nur wenige Berichte diese Zielmenge erreicht. Zudem waren viele Sprengplätze mit herkömmlichen Untersuchungsstrategien (Sondierbohrungen; Bestimmung von Einzelproben) erkundet worden. Die Erkenntnisse der amerikanischen Studie deuten daher darauf hin, dass bei der Sprengplatzerkundung in Deutschland ein deutlicher Optimierungsbedarf insbesondere hinsichtlich der Untersuchungsstrategien besteht.

Auf dem Handgranatenwurfstand in *Fort Wainwright* (Alaska) waren z. B. fünf Einzelproben (*discrete samples*) entnommen worden, sowie aus den gleichen Bereichen fünf Mischproben aus Vielfach-Einzelproben (*multi increment samples*). Für die Mischproben wurden jeweils 5, 10, 20 und 40 Einzelproben (im Sinne von Einzelproben-Entnahmestellen) entnommen. Die Entnahmepunkte befanden sich alle in einem Raster von 10x10 m. Die RDX-Konzentrationen schwankten hierbei von 0,78 bis 24 mg/kg sehr stark. Die Konzentrationsschwankungen der Mischproben aus 5, 10, 20 und 40 Einzelproben betrugen dagegen lediglich 6 bis 14 mg/kg, 10 bis 28 mg/kg, 7,1 bis 14 mg/kg und 6,5 bis 13 mg/kg. Die Abnahme in der Streubreite wurde auch bei drei weiteren Untersuchungsparametern festgestellt.

Als weiteres Beispiel für die Bedeutung der Anzahl von Einzelproben führen die Autoren die Beprobung in *Fort Petawana* (Ontario, Kanada) an. Hier wurden dreifache Mischproben im Sinne einer Dreifach-Beprobung (triplet samples) aus je 100 Einzelproben entnommen. Im Ergebnis ergaben sich durchschnittliche Konzentrationen von lediglich  $0.63 \pm 0.25$  mg/kg (RDX),  $0.22 \pm 0.07$  mg/kg (HMX) und  $0.14 \pm 0.08$  mg/kg (TNT).



Abb. 4: Statistische Prüfung der Aussagefähigkeit bei heterogener Schadstoffverteilung und Entnahme von Einzelproben. Ziel auf der Cold Lake Air Weapons Range, Alberta (Kanada).

Eine Untersuchung von Einzelproben wird nur empfohlen

- >> wenn Rückstände im Umgriff von aufgebrochener Munition (low-order detonations) bestimmt werden sollen
- » wenn lose Sprengstoffbrocken auf der Bodenoberfläche visuell erkenntlich sind,
- > oder wenn es gilt, hohe Konzentrationen im oberflächennahen Bereich zur Tiefe hin abzugrenzen (im Bereich von Zentimetern).

Eine Tiefenerkundung (im cm-Bereich) macht auf Sprengplätzen keinen Sinn: Unberührte (nicht verlagerte) "aufgebrochene Kampfmittel" mit Sprengstoffbrocken im direkten Umfeld treten auf Sprengplätzen nur in Ausnahmefällen auf, da Trichter und Umgriff bei der Entmunitionierung stets umgearbeitet worden sind und der Auswurfbereich in der Regel mehrfach übersprengt und danach umgearbeitet worden ist. Eine tiefenzonierte Beprobung kann jedoch in einem unverfüllten Trichter sinnvoll sein.

Es wurde festgestellt, dass die Rückstände generell in partikulärer Form vorliegen, sodass "jeder Probe eine Heterogenität innewohnt, die maßgeblich zur "Ungewissheit" beiträgt".

Im Bericht wird der Begriff "compositional heterogeneity" verwendet. Er wird sinngemäß so erklärt: "[…] die Heterogenität, die jedem Partikel innewohnt, aus dem sich die Probe zusammensetzt". Auf diese Problematik wurde auch im Anhang 2.1 "Erfahrungen bei der Sprengplatzbearbeitung in Deutschland" verwiesen: Die Heterogenität ist nicht nur im Gelände und in der entnommenen Rohprobe zu finden, sondern auch in der gebildeten Labormenge und der letztlich untersuchten Analysenmenge.

Nachdem sich diese besonderen Verhältnisse bei der Untersuchung von Explosivstoffrückständen aus Munition abgezeichnet hatten, wurde die in den USA von der EPA im SW846 (*Test Methods for Evaluating Solid Waste*) bisher vorgegebene Methode 8330 (Bestimmung von Nitroaromaten und Nitraminen durch HPLC) für Sprengstoffkontaminationen aus Detonationsrückständen modifiziert. Um die Heterogenitäten innerhalb der Analysenmenge besser in den Griff zu bekommen, wurde auf Vorschlag des Forscherteam das zu untersuchende Kornspektrum von ursprünglich < 0,59 mm auf < 2 mm erhöht und die Analysemenge auf 10 g erweitert. Auslöser für die Änderungen bei der Korngröße waren die Untersuchungsergebnisse am Handgranatenwurfstand in *Fort Lewis* (Washington). Hier hatte sich gezeigt, dass die Hälfte der RDX-Rückstände und mehr als die Hälfte der TNT-Rückstände in einer Korngröße zwischen 0,59 und 2 mm vorlagen. Ähnliche Ergebnisse hatten sich auch bei der Untersuchung von Rückständen aus Treibmitteln ergeben.

Die verwendete Analysemenge war in den gesichteten deutschen Gutachten meistens nicht angegeben. Vermutlich werden bei der Untersuchung auf Sprengstoffe 5 oder 10 g verwendet. Diese geringe Menge kann ebenfalls zur mangelnden Repräsentativität der Analysenergebnisse beitragen. Beim untersuchten Kornspektrum ergeben sich keine Unterschiede, da auch in Deutschland die Kornfraktion bis 2 mm untersucht wird.

Wurden die (Einzel-)Proben nach dem Sieben jeweils gemahlen, so führte dies zu einer deutlichen Reduzierung der Standardabweichung, manchmal in der Größenordnung von zwei Zehnerpotenzen. Im Bereich von Abschussstellen traten die Pulverrückstände häufig in Form von Fasern auf. Die Proben wurden daher über 5 min in 1 min - Intervallen gemahlen. Dazwischen ließ man das Material jeweils kurz abkühlen, um eine Entzündung zu vermeiden. Nach dem Mahlen wurde die Probe dann intensiv vermischt und in Form einer 1 cm dicken Lage ausgebreitet. Anschließend wurden nach dem Zufallsprinzip mindestens 30 Einzelproben entnommen und hieraus eine Mischprobe von 10 g gebildet, die gleichzeitig die Labor- und Analysenprobe darstellte. Die 10 g Probenmenge wurde dann mit 20 ml Acetonitril im Ultraschallbad oder im Schüttler für 18 h extrahiert.

Hier ergeben sich große Unterschiede zur in Deutschland üblichen Vorgehensweise. Hierauf wird im Schlusskapitel näher eingegangen.

#### 3.1.2 Sprengstoffkontaminationen

#### 3.1.2.1 Handgranatenwurfstände

Es wurden 13 Handgranatenwurfstände untersucht. Die üblicherweise in den USA verwendeten Versionen M67 und C13 sind mit *Composition B* gefüllt, einer Mischung aus RDX und TNT im Verhältnis 60/39% (1 % Wachs). Nach den Analysenergebnissen teilen die Autoren die Plätze in zwei Gruppen auf – Plätze mit nur sehr geringen Belastungen (RDX bis max. 0,12 mg/kg) und Plätze mit Konzentrationen von 0,45 bis 51 mg/kg. Die erhöhten Werte werden auf Teildetonationen oder auf Sprengung von Blindgängern zurückgeführt, da parallel durchgeführte Grundlagenversuche (siehe Kapitel 3.3 Rückstandsbestimmungen) darauf hindeuten, dass bei einer "bestimmungsgemäßen" Umsetzung dieses Munitionsarten nur Spuren von Rückständen verbleiben. Zusammenfassend stellen die Autoren fest, dass es auf Handgranatenwurfständen trotz mehrerer tausend Würfe pro Jahr im Regelfall nicht zu einer signifikanten Anreicherung von Rückständen kommt.

Die Autoren folgern, dass die geringe räumliche Erstreckung und die häufige Nutzung, die mit einer ständigen Umlagerung des Bodens einhergeht, dazu führen, dass die Heterogenität in den Bodenproben geringer ist. Dementsprechend haben sich auf Handgranatenwurfständen Mischproben aus rund 30 Einzelproben als ausreichend repräsentativ erwiesen.



Abb. 5: Impact-Area Handgranaten-Wurfstand Fort Lewis.

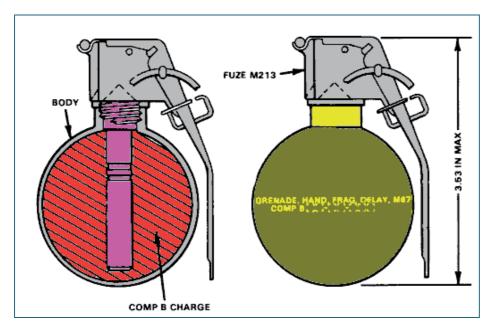


Abb. 6: US-Splitterhandgranate M67 mit Composition B-Füllung.

Wie bereits erwähnt, lagen bei der Untersuchung des Handgranatenwurfstands in *Fort Lewis* (Washington) die Hälfte der RDX- und mehr als die Hälfte der TNT-Rückstände in einer Korngröße zwischen 0,59 und 2 mm vor. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich bei Rückständen von Treibmitteln (siehe Kapitel 3.1.3 Pulverkontaminationen).

#### 3.1.2.2 Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen

Im Rahmen des Projekts ER-1155 wurden **acht Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen** überprüft. In der Regel werden die aufgestellten Hartziele (*hardtargets*) mit der *LAW66* (*Light Antitank Weapon*), beschossen, einer Hohlladungsgranate, deren Gefechtskopf Oktol enthält, eine Mischung von Oktogen und TNT im Verhältnis 70/30%. Im direkten Umgriff der Ziele treten stets sehr hohe Kontaminationen an Oktogen auf (in der Regel einige 100 mg/kg), die mit zunehmender Distanz zum Hartziel deutlich abnehmen. Diese im Vergleich zu anderen Szenarien der Munitionsanwendung extrem hohen Konzentrationen liegen daran, dass dieser Munitionstyp verstärkt zu Fehlfunktionen neigt und sehr häufig beim Aufprall zerbricht ohne zu detonieren. Hierbei wird der Sprengstoff in kristalliner Form im Umgriff der Ziele verteilt.<sup>3</sup>

\_

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> DUBÉ et. al. (CFB Valcartier) gibt eine Versagerquote von 50 % an [215].



Abb. 7: Ehem. Hartziel auf einer stillgelegten Panzerabwehrschießbahn.

Auch der Umgriff von Hartziele zeichnet sich durch heterogene Schadstoffverteilung aus. Auf dem *CFB Valcartier* (Quebec, Kanada) wurde ein 10 x 10 m großer Bereich direkt vor einem Hartziel in 100 Zellen mit Kantenlänge 1 x 1 m unterteilt. In jedem Bereich wurde aus dem Tiefenhorizont bis 1,5 cm eine Einzelprobe entnommen. Die ermittelten Konzentrationen schwankten von 8 bis 1.520 mg/kg. Dies belegt nach Ansicht der Autoren wiederum die Auffassung, dass Einzelproben nicht geeignet sind, die durchschnittliche Konzentration einer Verdachtsfläche zu ermitteln. Zur Charakterisierung von Zielgebieten erwiesen sich Mischproben aus vielen Einzelproben (multi samples) ebenfalls als deutlich besser geeignet. Das maschinelle Mahlen Vor Ort und die Erhöhung der Analysenmenge auf 10 g führte auch hier zu einer deutlichen Reduzierung der Streubreite.



Abb. 8: M72 LAW66, Waffe (unten) und unterkalibrige, flügelstabilisierte Munition (oben).

Die Erkenntnisse zur Heterogenität lassen sich wie bereits ausgeführt auf Sprengplätze übertragen: Wie die Auswertung der deutschen Gutachten ergab, traten auch hier bei Einzelproben extrem starke Schwankungen auf. Daher ist bei Sprengplätzen die Untersuchung von Einzelproben (z. B. aus Sondierbohrungen mit meterweiser Untersuchung der Bohrguts) nicht zielführend.

#### 3.1.2.3 Artillerieschießbahnen

Zielgebiete (*impact areas*) von **Artillerieschießbahnen** liegen meist im Zentrum eines Übungsareals und werden von mehreren Abschussstellen (*fire points*), die Radial in größerer Entfernung angeordnet sind, anvisiert. Jeder Abschussstelle ist eine Sicherheitszone bis zum Zielgebiet zugeordnet, in der nur ein sehr kleiner Teil der abgefeuerten Geschosse (z. B. mit Fehlfunktion) niedergeht. Wie PENNINGTON et. al. resümieren [**208**], detoniert der wesentliche Teil der Munition am Aufschlagspunkt und setzt hierbei die Füllung vollständig um. Es entsteht ein Trichter, dessen Ausmaße vom Typ der verwendeten Munition und den örtlichen Bodenverhältnissen abhängen. Ein kleiner Teil der Geschosse detoniert nicht und verbleibt als Blindgänger (UXO *unexploded ordnance*). Die Tiefenlage ist abhängig von den Bodenverhältnissen. Bei anstehendem Fels liegen die Blindgänger direkt auf der Bodenoberfläche.

Ein kleiner Teil der Geschosse detoniert unvollständig (in diesem Fall spricht man von *low-order deto-nation*). Sie ist nach PENNINGTON dadurch charakterisiert, dass große Teile des Gehäuses mit Sprengstoffresten oder -anhaftungen verbleiben und im Umgriff der Verpuffungsstelle Sprengstoffreste in Brockenform sowie in mikrokristalliner Form freigesetzt werden. Gelegentlich detoniert eine Granate auch so nah an einem Blindgänger, dass (vor allem durch Splitterflug) eine Teildetonation des Blindgängers initiiert wird. Auch hierbei können wiederum bedeutende Anteile der ursprünglichen Füllung im Umgriff verteilt werden [123].

Dieses Szenario ist sehr wahrscheinlich in ähnlicher Form auf die Verhältnisse bei Massensprengungen nach dem Krieg übertragbar. Auch hier setzte oft nur ein Teil der Munition vollständig um. Erhebliche Mengen an Blindgängern entstanden, die zum Teil in die Trichterwände und -böden gedrückt wurden (Anhang 1 "Historische Hintergrundinformationen"). Durch mehrfache Nutzung der Sprengstellen ohne vorherige Räumung können diese Blindgänger sekundär initiiert worden sein. Es ist vorstellbar, dass bei dieser indirekten Form der Umsetzung ein wesentlich höherer Anteil an Low-Order-Rückständen entsteht, als bei der Einzelsprengung von Munition. Der Anteil lässt sich jedoch nicht abschätzen. Es ist möglich, dass hierin das zum Teil deutlich höhere Kontaminationspotenzial von Massensprengplätzen begründet ist. Wie in den nachfolgenden Kapiteln ausgeführt, wird bei Low-Order-Umsetzungen auch ein erheblicher Anteil der Sprengstoffs in Form von kleinen Partikeln freigesetzt wird. Der Begriff "low-order" wird im Rahmen der Arbeitshilfe nicht ins Deutsche übersetzt, da er sich als Fachbegriff durchgesetzt hat.

Bei einer **Low-Order-Detonation** liegt die Umsetzungsrate der Sprengstofffüllung deutlich unter 100 %. Eine Low-Order-Detonation ist typischerweise charakterisiert durch eine längere Brennzeit, eine höhere Lichtintensität, durch reduzierten Sprengdruck und durch das Auftreten von Sprengstoffrückständen, die weder während der Detonation verbraucht noch danach im Feuerball verbrannt wurden. Der nicht umgesetzte Sprengstoff kann aus dem Geschoss herausgeschleudert werden oder auch in geschmolzener Form vorliegen und somit in die Umwelt gelangen. Die Menge an nicht umgesetztem Sprengstoff hängt vermutlich von der Energieausbeute der Detonation, ihrer Größe bzw. Intensität und von der Brennzeit des Feuerballs ab [123].

Amerikanische Schießbahnen sind großteils über Jahrzehnte genutzt worden. Die Zielgebiete beherbergen daher eine große Bandbreite an Blindgängern. Den wesentlichen Anteil der verwendeten Mu-

nition bilden Artillerie- und Wurfgranaten. Raketen, Lenkwaffenflugkörper sowie Air Force- und Navy-Bomben fanden nur untergeordnet Verwendung. Heute wird vor allem mit 105 mm und 155 mm Haubitzgranaten, 120 mm Panzerkanonen-Geschosse und 60, 81 und 120 mm Wurfgranaten geübt. Die Granaten werden durch ein-, zwei- und dreibasige Pulver angetrieben. Raketen und Lenkwaffenflugkörpern werden von Raketentreibstoffen angetrieben. Einbasige Pulver bestehen aus Nitrocellulose (NC) und 2,4-DNT, zweibasige Pulver aus NC und Nitroglycerin (NG), dreibasige Pulver aus NC, NG und Nitroguanidin (NQ). In den Granaten kommen TNT oder Composition B (60% RDX; 39% TNT; 1% Wachs) als Sprengstoffe zum Einsatz. Ältere Munition kann auch Tetryl enthalten. Nebelmunition (Smoke) enthält Weißen Phosphor (WP). Bomben, die auf einigen der Ranges abgeworfen werden, sind mit TNT oder Tritonal (Mischung aus TNT und Aluminium) gefüllt. Die Ladung von 40 mm Granaten besteht aus Composition A5 (Hexogen), die der *LAW66* aus Oktol, einer Mischung aus TNT und Oktogen.

Es gibt keine systematische Erfassung, welche Munition auf deutschen Sprengplätzen vorrangig vernichtet worden ist bzw. welche Kampfmittel heute bei Räumungen vorrangig geborgen werden. Daher ist hier kein Vergleich mit den amerikanischen Verhältnissen möglich. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass der Anteil an Munition mit kleineren Kalibern (z. B. 2 cm-Granaten, 3,7 cm Granaten, Infanteriemunition u. ä.) wesentlich höher war, da sie in deutlich größeren Stückzahlen produziert worden ist.

Die amerikanischen Sprengstoffe entsprachen mit Ausnahme des Oktogen denen der Wehrmacht. Vermutlich wurde in den USA jedoch wesentlich mehr Hexogen als im Deutschen Reich verwendet. Deutsche Sprengstoffe wurden darüber hinaus in erheblichem Maß gestreckt (siehe Teilbericht der Arbeitshilfe "Exemplarische Untersuchung von Beutemunition"). Auch die Hauptkomponenten des amerikanischen Pulvers stimmen mit den Komponenten des Wehrmachtpulvers überein. Zu Stabilisatoren (DPA, Akardite, Centralite) oder Weichmacher (Phthalate) werden in den amerikanischen Berichten keine Angaben gemacht.

Im Rahmen des ER-1155-Projekts waren auf insgesamt 16 Artillerieschießbahnen Proben entnommen worden. Da zunächst nur sehr wenige Informationen über das Vorkommen von Rückständen vorlagen, deckten die Entnahmebereiche verschiedene Szenarios ab, so z. B. Feuerstellungen, Zielgebiete und Bereiche in und im Umgriff von Detonationstrichtern, Low-Order-Detonierern, Blindgängern, Anhäufungen von Sprengstoffbrocken sowie abseits von Verdachtsstellen.

Die **Ziele** auf Artillerie-Schießbahnen bestehen in der Regel aus ausgemusterten gepanzerten Fahrzeugen. Der Beschuss ist hier in der Regel sehr intensiv. Es wurden fünf Zielbereiche auf verschiedenen Standorten durch Mischprobentechnik und Einzelproben untersucht. Die meisten Proben wiesen nur Konzentrationen unter 1 mg/kg auf. Allerdings konnten wegen des Blindgängerverdachts nur die obersten cm des Untergrunds untersucht werden. Das Umfeld vom Hartzielen schien zusammenfassend keine signifikanten Belastungen durch Sprengstoffe aufzuweisen.

Auf mehreren Standorten wurden auch Bodenproben im Bereich von **Granaten-Explosionsstellen** und **Blindgängern** entnommen. Die Bereiche erwiesen sich ebenfalls nicht als nennenswert belastet. Allerdings führt die Vernichtung von Blindgängern mit C4 (Hexogen) zu nachweisbaren Verunreinigungen im Umfeld der Sprengstelle (PENNINGTON).

Hierauf wird noch detailliert in einem der folgenden Kapitel eingegangen. Die Ergebnisse dieser ordnungs- bzw. bestimmungsgemäßen Umsetzungen von Munition (detonation as designed) sind nicht übertragbar auf das Szenario der nicht bestimmungsgemäßen "Massenvernichtung" von Munition nach dem 2. Weltkrieg.

Die höchsten Bodenbelastungen auf Artillerieschießbahnen traten stets bei Granaten auf, die **low-order detoniert** waren. Neben diesen Objekten waren auch stets lose Sprengstoffbrocken an der Oberfläche zu beobachten. Die Autoren verweisen darauf, dass die repräsentative Beprobung dieses Typs nach wie vor große Schwierigkeiten bereitet, da sich bisher auch "multi increment-Proben" als nur eingeschränkt geeignet erwiesen haben.

Die höchste Konzentration an Sprengstoff, die z. B. im Umfeld eines Low-Order-Detonierers gemessen wurde, lag bei 130 g/kg TNT (*Fort Hood;* Texas). An diesem Schadensbereich waren auf einer 10x10 m großen Fläche, die in 1x1 m große Teilflächen untergliedert worden war, insgesamt 100 Einzelproben entnommen worden. Die sichtbare Menge an Composition B auf der Geländeoberfläche war vorher eingesammelt und getrennt von den Bodenproben gewogen worden. Die Hexogen-Konzentration variierte in den Bodenproben von 0,037 bis 2.390 mg/kg. Die höchsten Konzentrationen (über 100 mg/kg) beschränkten sich jedoch auf zwei kleine Bereiche, in deren Nähe auch Brocken auf der Oberfläche beobachtet worden waren. Insgesamt konnte das Resümee gezogen werden, dass sich 2/3 des gesamten Hexogens im Boden in der Kornfraktion < 2 mm befinden, und ein Drittel in Form der sichtbaren Sprengstoffbrocken vorliegt.

Dies ist eine entscheidende Aussage: Ein erheblicher Anteil der Rückstände liegt offensichtlich in Form kleiner, visuell nicht sichtbarer Partikel vor.

Generell traten viele der Low-Order-Detonierer abseits der Zieleinrichtungen auf. Vermutlich stellen sie zumindest zum Teil ehemalige Blindgänger dar, die sekundär initiiert worden sind. Low-order-Detonierer und Munitionsteile mit offen liegendem Sprengstoff stellen nach Auffassung der Autoren die Haupteintragsquellen für Sprengstoffe auf Artillerieschießbahnen dar. Die Identifizierung von Blindgängern bzw. Low-Order-Detonierern läuft bisher noch visuell, jedoch werden derzeit Geräte entwickelt, die Messungen von Rückständen (bzw. Sprengstoffen in der Gasphase) in nahezu Echtzeit erlauben.



Abb. 9: Low-order detonierte 155 mm Sprenggranate.

Es ist bemerkenswert, dass im direkten Umfeld von Low-Order-Detonationen auch im Boden selbst hohe Belastungen auftreten und die sichtbaren Brocken nur ein Drittel des gesamt Emissionspotenzials ausmachen. Bei der Massenvernichtung von Munition auf Sprengplätzen ist anzunehmen, dass - wie bereits ausgeführt - ein deutlich höherer Anteil an Low-Order-Detonationen stattgefunden hat. Inwieweit auch hier das Verhältnis 1/3 zu 2/3 für sichtbaren zu Sprengstoff < 2 mm vorliegt, ist bisher nicht geklärt.

Auf mehreren **Schießbahnen** wurden flächenhafte (Raster-)Proben entnommen, die zwar innerhalb der Sicherheitsbereiche jedoch abseits von Feuerstellungen oder Zielen lagen. In den allermeisten

Proben waren hier keine Rückstände von Explosivstoffen nachweisbar. In den wenigen positiven Proben waren lediglich geringe Mengen nachweisbar. Dies bestätigte sich auch auf anderen Übungseinrichtungen. Der wesentliche Teil von Schießbahnen ist daher als unbelastet anzusehen.

Diese Konzentrierung auf das direkte Umfeld von Deflagrations- bzw. Detonationsstellen ist auch auf das Szenario "Sprengplatz" übertragbar. Mit zunehmender Entfernung vom Sprenggeschehen sinkt die Wahrscheinlichkeit von Bodenkontaminationen deutlich ab. Es macht daher keinen Sinn, wie in den ausgewerteten deutschen Gutachten verschiedentlich beschrieben, Bodenproben in Entfernungen von über 100 m vom Trichterfeld oder mehr zu entnehmen.

#### 3.1.2.4 Bombenabwurfplätze

Bombenabwurfplätze sind hier nicht von Relevanz, da entsprechend den Angaben der US-EPA [398] Bombenabwürfe in der Regel mit sprengstofffreier Übungsmunition durchgeführt werden.



Abb. 10: Probenahme im Umgriff einer low-order detonierten 2000 lbs Bombe auf der Holoman Base.

#### 3.1.2.5 Sprengplätze

Das folgende Kapitel der Studie ER-1155 geht auf die Rückstände der Sprengmittel bzw. der Zerstörladungen ein. Es handelt sich zwar nicht um "Verschuss", jedoch um eine bestimmungsgemäße Umsetzung, sodass die Ergebnisse an dieser Stelle dargestellt werden.

Wie die Autoren ausführen, werden alle Objekte, die als *safe to move* eingestuft werden, auf hierfür eigens ausgewiesenen Sprengplätzen vernichtet. Vereinzelt werden dort auch Sprengstoffbrocken oder unverbrauchtes Treibmittel durch Sprengen oder Abbrennen zerstört.

Mengenmäßig betrachtet dürften die US-Sprengplätze nicht mit den Massensprengplätzen in Deutschland nach dem 2.WK zu vergleichen sein.

Sprengplätze sind meist nur wenige Hektar groß. Im Umfeld von aktuell genutzten Sprengtrichtern fehlt die Vegetation, da sie im Regelfall viele Male genutzt werden, bevor sie rückverfüllt werden. Bei der Sprengung wird in der Regel eine bestimmte Menge an C4-Sprengstoff (Hexogen) auf dem Kampfmittel platziert und mit einer Sprengkapsel zur Detonation gebracht. Einheitliche Vorschriften bei der Vernichtung von Munition gibt es nicht.

Die Untersuchungsergebnisse auf Sprengplätzen deuten nach Ansicht der Autoren darauf hin, dass sich bei einigen Sprengungen nennenswerte Rückstände niederschlagen, insbesondere wenn eine Low-Order-Umsetzung stattfindet oder der C4 Sprengstoff nicht vollständig durchdetoniert. So werden z.B. auf manchen Sprengplätzen der Air Force mittels C4-Sprengstoff Löcher in Übungsbomben gesprengt, um sicherzustellen, dass sie keinen Explosivstoff enthalten, bevor sie zu Recyclingzwecken abtransportiert werden. Zwei Plätze dieser Art wurden im Rahmen des ER-1155-Projekts untersucht.

Auf der *Eglin Air Force Base* (Florida) lag der Mittelwert aus sechs Einzelproben bei 8,8 mg/kg (RDX) und 0,54 (HMX) mg/kg. Auf dem Sprengplatz der *Holoman Airforce Base* (New Mexiko) betrug der Durchschnittswert der Mischprobe aus 30 Einzelproben im 25 m-Umgriff um den Sprengtrichter 11,4 mg/kg (RDX) bzw. 1,84 mg/kg (HMX). Da die gesprengten Übungsbomben keinen Sprengstoff enthalten, sind die nicht unerheblichen Bodenkontaminationen auf Rückstände des Sprengmittels (in diesem Fall C4) zurückzuführen.

Das zum Sprengen von Blindgängern üblicherweise verwendete C4 ist nicht fest eingehüllt (unconfined charge) ist. Die Autoren vermuten, dass hierdurch der Sprengstoffumsatz bei der Detonation niedriger ist, als bei eingehülltem Sprengstoff. Druck und Temperatur, die die Vollständigkeit einer Umsetzung wesentlich bestimmen, sind in diesem Fall wesentlich geringer.

Auch bei den Sprengungen in der Nachkriegszeit wurde sehr häufig loser Sprengstoff (gepresstes TNT) als Schlagladung verwendet. Vermutlich hat dies zu zusätzlichen Bodenbelastungen geführt.

Weitere Oberflächenmischproben wurden auf den Sprengplätzen Fort Polk (Loiusiana), Schofield Barracks (Hawai), Militäry Camp Pohakuola (Hawai), CFB Petawawa (Ontario Kanada), CLAWR (Alberta, Kanada) und Camp Shelby (Massachusetts) entnommen. Diese Plätze dienen der Vernichtung Sprengstoff-gefüllter Munition. Mit Ausnahme von zwei Proben der CLAWR enthielten alle Proben RDX und HMX, wobei die Konzentrationen der beiden Sprengstoffe von <0,03 mg/kg (CLAWR) bis 60,2 mg/kg (Pohakuola) stark schwankten.

Diese Ergebnisse stützen die Schlussfolgerungen, die sich aus der Auswertung der deutschen Gutachten ergeben hatten: Bodenproben von Sprengplätzen, die repräsentativ entnommen wurden, sind in der Regel belastet wobei die Schwankungsbreite der Ergebnisse sehr hoch ist.

Auf mehreren der genannten Plätze wurden bei der Probenahme auch lose Brocken von C4-Sprengstoff auf der Oberfläche vorgefunden. Die Autoren vermuten als Ursache Teildetonationen des verwendeten Sprengstoffs. Bei einer Vor-Ort-Sprengung auf dem *Redstone Arsenal* (Alabama) wurden kleine Bruchstücke von nicht detoniertem C4 über eine kleine Fläche verteilt, da eine der beiden zur Initiierung vorgesehenen Sprengkapseln nicht zündete und die verbleibende Kapsel allein den gesamten Block nicht umzusetzen vermochte.

Ähnliche Szenarien waren sicherlich auch nach dem Krieg vorstellbar, da oft mit veralteten (oder auch feuchten) Sprengmitteln gearbeitet wurde. Es ist anzunehmen, dass auch hier keine vollständige Umsetzung erfolgt ist.

TNT trat ebenfalls in einigen Proben auf Sprengplätzen auf. Mit Ausnahme von zwei Proben waren die Gehalte jedoch stets niedriger als 0,6 mg/kg.

In einigen Bodenproben traten ebenfalls NG und DNT auf. Die Autoren konnten diesbezüglich nicht klären, ob die Rückstände beim Abbrand oder beim unsachgemäßen Sprengen von Pulver zurückzuführen sind.

Bodenproben auf US-Sprengplätzen sind vor allem durch Hexogen belastet. Dies ist auf die nicht vollständige Umsetzung der C4-Ladungen zurückzuführen.

Insbesondere auf deutschen Sprengplätzen, die nach dem Krieg von US-Einheiten errichtet bzw. genutzt worden sind, wurde Pulver oft zusammen mit Munition durch Sprengen vernichtet. Daher tritt auch hier häufig der Parameter DNT als Kontaminante auf (Anhang 2.1).

#### 3.1.3 Pulverkontaminationen

Neben Rückständen von Sprengstoffen wurden im Rahmen der US-Studie auch Kontaminationen durch Treibmittel bzw. Pulver überprüft.

Diese Parameter werden auf den deutschen Sprengplätzen bzw. Liegenschaften eher selten untersucht.

Es wurden sechs Feuerstellungen von Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen untersucht. In allen Fällen stellte Nitroglycerin (NG) die Hauptkomponente dar. Die Konzentrationen bis 25 m hinter der Abschussstelle (entgegen der Schussrichtung) hatten zum Teil im Bereich einiger hundert mg/kg gelegen, während sich die Konzentrationen in Schusslinie in der Regel als deutlich niedriger erwiesen. Auch hier zeigte sich, dass die Entnahme von Mischproben (in diesem Fall aus 30 Einzelproben) wesentlich belastbarere Ergebnisse liefert, als die Entnahmen von Einzelproben.

Im Rahmen der Studie wurden auch **Feuerstellungen von Artillerie-Schießbahnen** untersucht. Je nach benutztem Treibmittel bildete 2,4-DNT, eine Nebenkomponente einbasiger Pulver, oder NG, eine Nebenkomponente mehrbasiger Pulvern, die Hauptkontaminante. Die Rückstände konnten bis in eine Entfernung von 100 m von der Rohrmündung nachgewiesen werden. Bei den meisten Artillerie-Abschussstellen wurden schwerpunktmäßig 105 mm-Granaten mit einbasigem Pulver als Treibladung verschossen. An diesen Stellen trat deshalb 2,4-DNT als Hauptkontaminante auf. Bei festen Abschussstellen können die Kontaminationen einige mg/kg erreichen.

Bei den Rückständen an Abschussstellen von 155 mm Granaten handelt es sich meist um NG aus zwei - oder dreibasigem Pulver. Sowohl NG als auch 2,4-DNT werden nach Beobachtungen der Autoren stets in einer Faser-Matrix abgelagert, die wahrscheinlich die Bioverfügbarkeit und die Anlaugbarkeit der Rückstände begrenzt. Allerdings scheint sich NG jedoch nicht wie DNT im Boden anzureichern.



Abb. 11: Abschussstelle einer ehem. Panzerschießbahn.

Das Vorliegen der Rückstände in Partikelform bestätigte auch ein Probeverschuss von 105 mm Haubitzgranaten, für den vor den Feuerstellungen Auffangbleche positioniert worden waren. Die mikroskopische Untersuchung des auf den Auffangblechen niedergegangenen Materials ergab, dass zumindest ein Teil der Rückstände aus unverbrannten oder teilverbrannten Pulverfasern bestand. Die fasern waren 0,4 bis 7,5 mm lang. Die unverbrannten Fasern enthielten hierbei deutlich höhere Konzentrationen an DNT als die teilverbrannten Fasern.

Nitrozellulose (NC) wurde an den Feuerstellungen generell nicht untersucht, da es sich um ein nicht umweltrelevantes Polymer handelt. Die Gefahr einer Ausbreitung über den Standort hinaus ist daher nicht gegeben. Darüber hinaus existieren keine genormten Untersuchungsverfahren, wenn diese Verbindung fein verteilt im Boden vorliegt.

Die höchsten Mengen an Pulverrückständen wurden bei den Untersuchungen auf *Fort Lewis* ermittelt. Dies führen die Autoren darauf zurück, dass kurz vor den Probenahmen 600 Granaten abgefeuert wurden. Lagen die 2,4-DNT-Konzentration bei mehr als 3 mg/kg, war oft auch 2,6-DNT, eine Verunreinigung im militärisch hergestellten 2,4-DNT, in geringen Mengen nachweisbar. Die Proben stammen hierbei alle aus den obersten Zentimetern des Bodenprofils. Einzelne Proben wurden auch aus

einer Tiefe bis 0,2 m entnommen. Hier war jedoch eine deutliche Konzentrationsabnahme von 10 auf 0,5 mg/kg festzustellen.

Auf dem *Yakima*-Übungsplatz konnten vor einer Feuerstellung noch in einem Abstand bis maximal 75 m DNT und NG im Boden nachgewiesen werden.



Abb. 12: 105 mm Haubitz-Stellung auf Fort Richardson, Alaska.

#### Bei Abbrennversuchen von losem Pulver verblieben 1,6% NG [210].

Diese Ergebnisse zu Pulverrückständen lassen sich indirekt auf die Massensprengplätze nach dem 2. WK übertragen: Insbesondere US-Truppen versuchten seinerzeit, Munition zusammen mit Kartuschen oder losem Pulver durch Sprengen zu vernichten. Auch die StEG sprengte generell unsichere Kartuschen oder patronierte Munition, die sich nicht zerlegen ließ. Es ist daher davon auszugehen, dass Pulvertypische Parameter auch auf vielen Sprengplätzen von Relevanz sind.

Die amerikanischen Untersuchungen identifizierten Nitroglycerin als einen der Hauptparameter der pulvertypischen Verbindungen auf aktuell genutzten Abschussstellen. Auf den deutschen Sprengplätzen ist es dagegen eher unwahrscheinlich, diese Verbindung (im Boden verteilt) anzutreffen, da die Wasserlöslichkeit sehr hoch ist. Zudem unterliegt NG einem raschen mikrobiologischem Abbau. Es ist daher auch im Grundwasser von Sprengplätzen im Regelfall nicht nachzuweisen. Trotzdem fanden sich bei der Auswertung der deutschen Gutachten vielfache Hinweise auf Belastungen der Originalsubstanz durch NG (und auch DNT). Es ist anzumerken, dass NG in diesen Fällen in Partikelform vorlag. So ist es auch erklärbar, dass in der Regel NG und 2,4-DNT vergesellschaftet auftraten.

Die Eluate der Originalproben erwiesen sich im Regelfall als unbelastet. Hierfür gibt es zwei Erklärungsmöglichkeiten:

- Partikel waren im Analysematerial für die Untersuchung der Originalsubstanz vorhanden, nicht jedoch im Material für das Eluat.
- NG, gebunden in Partikelform, ist nicht oder kaum löslich.

Im Rahmen der ER-1155-Studie wurden zunächst nur Laborversuche zur Bestimmung der Löslichkeit bzw. der Lösungsraten mit den Hauptsprengstoffen durchgeführt. Aktuelle ergänzende Untersuchun-

gen, mit festen Pulverpartikeln [220] ergaben jedoch, dass sich das Verhalten von Pulver in der Umwelt deutlich von dem der Sprengstoffe unterscheidet. In Laborversuchen stellte sich heraus, dass die Stoffkonzentrationen für 2,4-DNT (Bestandteil einbasiger Pulver) und für NG (Bestandteil zweibasiger Pulver) nach zehn Tagen Kontakt mit Wasser erst 1/100 bzw. 1/5 der jeweiligen Löslichkeiten der beiden Verbindungen erreicht hatten. Auch waren erst 0,9% (DNT) bzw. 7,4% (NG) der ursprünglich eingebauten Pulvermenge in Lösung gegangen. Dies ist nach Aussagen der beiden Autoren, entweder auf die höhere Löslichkeit des NG zurückzuführen oder darauf, dass das zweibasige Pulver stärker angewittert war.

Säulenversuche mit drei Böden, die durch zweibasiges M7 Pulver kontaminiert waren, belegten, dass im Ablauf des Systems nur zwischen 1,2 und 1,4 % der ursprünglich vorhandenen Ngl-Menge zu finden waren. Bei dotierten Proben, d. h. Böden, die mit Pulverrückständen versetzt und gemahlen wurden, betrug der Anteil im Ablauf der Säulen 78,4 %.

Bei Versuchen mit einbasigen M1-Pulvern waren die Verhältnisse noch deutlicher: In den natürlichen Böden war im Systemauslauf kein 2,4-DNT nachzuweisen. In den gemahlenen Laborproben stellten sich dagegen anfangs Konzentrationen von über 16 mg/l, die dann jedoch rasch um eine Zehnerpotenz abnahmen. Während des Versuchs war rund ein Viertel der ursprünglichen Menge in Lösung gegangen. Erst das Mahlen führte in beiden Fällen zu einer relevanten Mobilisierung.

Dies ist bei der Gefährdungsabschätzung von Sprengplätzen mit Pulvernachweisen von Bedeutung: NG- oder 2,4-DNT-Nachweise in Bodenproben (Originalsubstanz) auf Sprengplätzen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Pulverrückstände in Partikelform zurückzuführen . In diesem Fall sind die beiden Zusätze in der NC adsorbiert, die wiederum selbst wasserunlöslich ist. Die Möglichkeit einer Grundwassergefährdung ist daher bei positivem Nachweis im Feststoff durch Eluatversuche abzuklären.

Andere Parameter, die auf Sprengplätzen von Relevanz sein können, wie DPA, Stabilisatoren und Weichmacher fanden bei den amerikanischen Untersuchungen keine Berücksichtigung.

Die Ausbreitung von NG und DNT vor bzw. hinter den Geschützen ist vermutlich nicht auf die Verhältnisse auf Sprengplätzen übertragbar, denn beim Verschuss treten Drücke auf, die in Schussrichtung gebündelt und im Bereich der initialen Flugtrecke sehr hoch sind. Dies führt zu einem relativ weiten Transport der un- oder halbverbrannten Pulverpartikel, wie er bei einer Sprengung mit allseitigem Druckaufbau nicht gegeben ist.

#### 3.1.4 Resümee

Der Bericht stellt fest, dass die Art der Rückstände, ihre Konzentration und ihre Verteilung vom Schießbahntyp bzw. der dort eingesetzten Munition abhängen. Die größten Belastungen auf Schießbahnen sind stets an das Umfeld von Low-Order-Detonierern gebunden, die Sprengstoff von mikrokristalliner Partikelgröße bis zu größeren Bruchstücken über die Bodenoberfläche verteilt haben.

Auf **Handgranatenwurfstände** können Low-Order-Detonierer beim Werfen oder bei der Sprengung von Blindgängern mit C4 entstehen. Die Hauptkontaminanten bilden RDX und TNT, da die Füllungen der am meisten verwendeten Handgranatentypen aus Composition B bestehen. Bei "frischen" Low-Order-Detonierern" liegen die Belastungen in der Regel im Bereich einiger mg/kg.

Auf Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen stellt die LAW66 den Hauptmunitionstyp dar. Das Kampfmittel ist mit Oktol gefüllt, weist eine sehr hohe Rate an Versagern auf und zerbricht leicht. Demzufolge konnten auf Schießbahnen hier die größten Belastungen im Bereich einiger 100 mg/kg nachgewiesen werden. Die Hauptkontaminante stellt der Füllung entsprechend das Oktogen dar. TNT tritt nur untergeordnet auf. Im Bereich der Feuerstellungen kommt zusätzlich NG vor. Es stammt aus mehrbasigen Treibmitteln, die ebenfalls in Partikelform vorliegen. Lokal können sehr hohe Bodengehalte auftreten; sie konzentrieren sich vor allem auf den Bereich hinter der Feuerlinie (entgegen der Schussrichtung).

Bei Abschussstellungen von **Artillerie oder Werfergeschützen** stellen in Abhängigkeit des verwendeten Treibmittels (ein- oder mehrbasig) 2,4-DNT oder NG die Hauptkontaminanten dar. Die Kontaminationen können sich bis in 100 m Entfernung von der Abschussstelle (Mündung) erstrecken. Beim Verschuss von 105 mm Granaten dominiert 2,4-DNT. Bei festen Feuerstellungen liegen die Belastungen im Bereich von einigen mg/kg. Die Rückstände liegen meist in Form von verbrannten und unverbrannten Partikeln vor. Bei den 155 mm-Granaten weisen die Abschussstellen Verunreinigen durch NG auf, da diese Munition mit mehrbasigen Treibmitteln verschossen wird. NG scheint sich jedoch nicht so stark anzureichern, wie 2,4-DNT. Die Rückstände werden wiederum in Partikelform abgelagert. Vermutlich ist dies mit einer geringeren Bioverfügbarkeit und Mobilisierbarkeit verbunden.

Im Umfeld von **Zielen** detoniert der Großteil der Kampfmittel high-order und hinterlässt hierbei nur geringe Rückstände. Nach Low-Order-Detonationen können allerdings Bruchstücke von reinem Sprengstoff verbleiben, so dass in diesen Bereichen häufig Konzentrationen an Explosivstoffen im g/kg-Bereich gemessen werden. Als Hauptrückstände treten TNT und RDX auf. Sie stammen, so vermuten die Autoren, entweder aus TNT-gefüllter Munition oder aus Füllungen mit Composition B, das in Wurfund Artilleriegranaten sehr häufig verwendet wird. Die Verunreinigungen können als "zufällig verteilte punktuelle Eintragsquellen" beschrieben werden. Es ist anzunehmen, dass einige der Quellen von Low-Order-Detonierern nach der Sprengung von Blindgängern entstanden sind. Zurzeit wird an einer Methode gearbeitet, diese Quellen messtechnisch zu orten. Ein geeignetes Probenahmeverfahren für diese Art der Schadstoffverteilung, das repräsentative Ergebnisse liefert, existiert derzeit noch nicht.

**Bomben** sind in der Regel mit Tritonal gefüllt. Dementsprechend sind in Abwurfbereichen vorrangig Kontaminationen durch TNT zu erwarten, außer die Füllung bestand aus H6. Die größten Kontaminationen im Bereich von zehn bis einigen hundert mg/kg waren wiederum im Umfeld von Explosionstrichtern zu beobachten, die auf Low-Order-Detonationen zurückgehen.

Auf **Sprengplätzen** stellt RDX die Hauptkontaminante, da dieser Sprengstoff vorrangig für die Sprengung von Blindgängern verwendet wird. Die Konzentrationen liegen im mg/kg-Bereich.

RDX und HMX stellen sich als am mobilsten heraus. Dies trifft sowohl für die Verlagerung im Boden zur Tiefe hin als auch für den Abtransport mit dem Oberflächenwasser zu.

# 3.2 Kontamination von Sediment, Grund- und Oberflächenwasser auf Schießbahnen

Wie eingangs ausgeführt, konzentrieren sich gemäß ER-1155-Studie die Schadstoffe auf Schießbahnen üblicherweise auf die obersten Zentimeter des Bodenprofils. Daher lag der Schwerpunkt der US-Untersuchungen vorrangig auf diesem Tiefenhorizont. Gelegentlich (vor allem in Kanada) wurden auf Schießbahnen jedoch auch ergänzende Proben aus Grundwasser und Oberflächengewässern sowie Sedimente aus diesen Gewässern entnommen, um die Ausbreitung der Rückstände beurteilen zu können. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen, die auch für die Gefährdungsabschätzung von Sprengplätzen bedeutsam sein können, werden im Folgenden getrennt nach Nutzungstypen zusammengefasst:

#### 3.2.1 Artillerie- und Bombenzielgebiete

#### 3.2.1.1 Grundwasser

Entlang der Grenzen des zentralen Zielgebiets von *Fort Lewis* (Washington) wurde eine Reihe von Quellen und Grundwassermessstellen beprobt. Bodenproben aus dem Zielgebiet in etwa 1 km Entfernung zu den Quellen hatten nur Spuren an RDX (bis 0,09 mg/kg), jedoch sehr hohe Konzentrationen an TNT (bis zu 15.000 mg/kg) enthalten. In den entnommenen Grundwasserproben war jedoch aus-

schließlich Hexogen im Konzentrationsbereich von < 0,04 bis 0,5  $\mu$ g/l nachweisbar. Die Ergebnisse der Quellen waren vergleichbar (RDX < 0,04 bis 0,73  $\mu$ g/l). Insgesamt erwiesen sich jeweils vier der fünf untersuchten Wasserproben als belastet.

Auf dem Standort *CFB Gagetown* (New Brunswick, Kanada) konnten durch Bodenuntersuchungen mehrere potenzielle Eintragsherde für Sprengstoffe lokalisiert werden. Auf dem Areal sind 53 Grundwassermessstellen vorhanden. Das Erkundungsprogramm umfasste die Untersuchung von 129 Grundwasser- und 30 Oberflächenwasserproben. Trotz der festgestellten Bodenbelastungen konnten in diesen beiden Medien bisher keine Belastungen festgestellt werden.

Ähnliche Verhältnisse liegen auf dem Western Area Trainig Center auf Fort Wainwright (Alberta, Kanada) vor. 28 Brunnen waren hier bisher ohne Nachweis.

Bei wiederholten umfangreichen Grundwasseruntersuchungen an 30 bis 80 beprobten Brunnen auf dem Übungsplatz der *CFB Shilo* (Manitoba, Kanada) sind bisher ebenfalls keine Belastungen durch Sprengstofftypische Parameter zu Tage getreten.

Auf zwei Zielgebieten der *CLAW* (Alberta, Kanada) sind 14 Grundwassermessstellen vorhanden. Bei sechs Beprobungszyklen mit 7 bis 19 untersuchten Proben hat sich in der Regel stets nur eine Messstelle als belastet erwiesen. Sie liegt etwa 200 m vom Haupteinschlagsgebiet entfernt. Drei Mal war Hexogen in Konzentrationen von 2,0 bis 7  $\mu$ g/l nachzuweisen, je nur einmal die Parameter 1,3-DNB (0,6  $\mu$ g/l), 2,6-DNT (0,4  $\mu$ g/l), 2,4-DNT (6,5  $\mu$ g/l), NG (0,5  $\mu$ g/l) und TNT (13  $\mu$ g/l).

#### 3.2.1.2 Oberflächengewässer

Die Untersuchung mehrerer Proben aus Oberflächengewässern auf der *CFB Shilo* (Manitoba, Kanada) hatte keine Hinweise auf Verunreinigungen durch Sprengstofftypische Verbindungen ergeben.

Als unbelastet hatten sich ebenfalls Proben aus Oberflächengewässern auf der *CLAWR* (Alberta, Kanada) erwiesen.

Im *Battle River*, der entlang der westlichen Grenze des *Fort Wainwright* (Alaska) verläuft, war lediglich eine Probe positiv (0,2 μg/l TNT). Andere Beprobungsstellen im Fluss sowie 25 weitere Oberflächenwasserproben enthielten keine Explosivstoffe. Aus einem Fluss, der abstromig eines Zielgebiets für Luft-Boden-Geschosse (105 mm Haubitzgranaten) liegt, wurden über zwei Jahre lang mehrmals Wasserproben entnommen. In allen sechs Proben konnten nur geringe Mengen an HMX, RDX, TNT sowie dessen Metaboliten < 1 μg/l gemessen werden. Zwei Quellen, die zwischen Fluss und Zielgebiet lagen, wiesen ebenfalls Rückstände an Sprengstoffen auf. Unmittelbar abstromig einer Fläche in einem zentralen Zielgebiet mit zahlreichen Trichtern wurden aus einem Bach Proben entnommen. Dem Bach fließen mehrere Nebenbäche zu, die wiederum andere Zielgebiete entwässern. Mit Ausnahme eines Einzelwertes (2,9 μg/l Hexogen) lagen alle Gehalte unter 1 μg/l.

#### 3.2.1.3 Ausgetrocknete Flussbetten und Drainagegräben

Sedimentproben wurden an zwei Stellen eines trockenen Kanalbetts auf einer Schießbahn von Fort Bliss abstromig von zwei zerbrochenen Artilleriegranaten entnommen. Beide Kampfmittel waren von Bruchstücken an losem Sprengstoff umgeben. Im Abstand von vier Metern von einem 155 mm Geschoss nahmen die TNT-Konzentrationen im Sediment um fünf Größenordnungen ab. Bei einer 90 mm Granate sanken die Oktogen- und Hexogen-Konzentrationen in den Sedimentproben bis in einem Abstand von sechs Metern um drei Größenordnungen ab, die von TNT um vier Größenordnungen. Auf der Grundlage der Sedimentuntersuchungen erachten die Autoren es als unwahrscheinlich, dass partikelförmige Rückstände über diese Entfernung transportiert worden sind.

Auf einem Fliegerschießplatz, auf dem von C-130 gun ships aus geschossen wird, erstreckte sich ein

zum Probenahmezeitpunkt feuchter Drainagegraben, der in etwa 80 m Entfernung unterhalb der liegt. Die entnommenen zehn Mischproben enthielten mehrere Sprengstofftypische Verbindungen in der Größenordnung von wenigen mg/kg.

In einem Flussbett unterhalb eines sehr intensiv genutzten Bombenabwurfplatzes wurden 14 Mischproben entnommen. Im Zielgebiet selbst sind zerbrochene Low-Order-Blindgänger und lose Sprengstoffbrocken vorhanden. Stichpunktartige Bodenuntersuchungen ergaben TNT-Durchschnittskonzentrationen von 5,9 mg/kg im Bereich der Low-Order-Detonationen und 0,28 mg/kg im Blindgänger-freien Bereich. Im Flussbett lagen die Konzentrationen unter 0,2 mg/kg. Lediglich eine Probe wies 2,3 mg/kg TNT auf. Die Autoren sehen die Ursache dieses Einzelbefunds in einem (in das Analysematerial gelangten) kleinen Körnchen aus Tritonal aus einer benachbarten Low-Order-Detonation. Insgesamt haben sich keine Hinweise ergeben, dass Sprengstoff-Partikel im Flussbett von dem Standort abtransportiert werden.

#### 3.2.1.4 Explosionstrichter

Einige Wochen nachdem eine live fire-Übung mit Boden-Boden- und Luft-Bodenmunition auf der *CFB Gagetown* stattgefunden hatte, wurde der Zielbereich beprobt. Unter den Probenahmestellen befand sich ein frischer Trichter, der pinkfarbenes Wasser enthielt. Aus dem Wasser ragte eine zerbrochene 250 lbs. Bombe hervor, die mit TNT gefüllt war. Mischproben im Abstand von 0 bis 2 m um den Trichter ergaben TNT-Konzentrationen bis 4.200 mg/kg; das Wasser enthielt 20 mg/l TNT.

Im Zuge der Untersuchung eines zentralen Zielgebiets, das mit Werfer- und Haubitzgranaten und Abwurfmunition beübt wird, wurden zwei wassergefüllte Trichter beprobt. Die Durchmesser betrugen 3 bzw. 6 m bei Tiefen von 1,5 m bzw. 2 m. Ergänzend wurde der Boden innerhalb und außerhalb des Trichterrands untersucht. Die Bodenproben innerhalb des kleinen Trichters enthielten Oktogen, Hexogen, TNT und Aminotoluole. Die Konzentrationen im Wasser des kleinen Trichters lagen mit 1,3 bis 3,1  $\mu$ g/l (HMX, RDX, TNT) deutlich über denen des großen Trichters (0,4 bis 0,7  $\mu$ g/l HMX, RDX, TNT).

Ein Ziel auf einer zentralen Artillerie-Schießbahn, in dessen Umfeld mehr als 600 Trichter und mehr als ein Dutzend aufgebrochene Geschosse vorhanden waren, wurde nach einem Regenereignis untersucht. In den Trichtern befand sich teilweise Wasser. Auf Grund der Hanglage floss das Wasser kaskadenförmig von den höheren in die tiefer liegenden Trichter. Es wurden drei Wasserproben entnommen. Eine Probe setzte sich aus zwölf Einzelproben aus verschiedenen Trichtern zusammen, die andern beiden stammten aus einem Trichter, in dem eine aufgebrochene 2,75 inch Rakete lag. Die Proben wurden an zwei aufeinander folgenden Tagen entnommen. Die Konzentrationen im Boden im Umfeld der beprobten Trichter lagen bei 0,2 mg/kg (HMX), 1,2 mg/kg (RDX) und 0,3 mg/kg (TNT). Alle Wasserproben enthielten Oktogen und Hexogen. Die Mischprobe wies 0,72  $\mu$ g/l Oktogen und 1,7  $\mu$ g/l Hexogen auf. Die Trichterwasserproben zeigten unterschiedliche Gehalte, wobei die Probe vom zweiten Tag, als der Trichter weniger Wasser enthielt und der Oberflächenwasserabfluss aufgehört hatte, deutlich niedrigere Konzentrationen enthielt (erster Tag HMX/RDX 0,69 bzw. 3,9  $\mu$ g/l; zweiter Tag HMX/RDX 0,25 bzw. 0,66  $\mu$ g/l.

Auf der C-130 Gun Ship-Schießbahn wurden sieben, teilweise auch "ältere" Trichter, in denen bereits Vegetation vorhanden war, beprobt. Nur in zweien konnten Rückstände nachgewiesen werden (um 0,4 µg/l Hexogen).

#### 3.2.2 Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen

#### 3.2.2.1 Grundwasser

Grundwasserdaten wurden bei dem Nutzungsszenario "Schießbahn für Panzerabwehrwaffen" bisher lediglich auf der *CFB Valcartier* erhoben. Hier wird mit der LAW 66 geübt. Es sind 25 Messstellen auf

bzw. abstromig der Schießbahn vorhanden. Sie wurden im Jahr 1998 im 2-wöchigen Turnus 13 mal beprobt. Von allen Untersuchungen, die bisher über Stützpunkte der kanadischen Armee veröffentlichten wurden, lagen hier die signifikantesten Hinweise auf Grundwasserkontaminationen vor. Die Hauptkontaminante stellt Oktogen gefolgt von TNT dar. Von 325 insgesamt untersuchten Proben enthielten 55 Proben Sprengstofftypische Verbindungen. Die Streubreiten betrugen bei Oktogen 2,4 bis 230 µg/l (insgesamt 55 positive Nachweise), bei TNT 0,25 bis 6,35 µg/l (insgesamt 7 positive Nachweise) und bei Hexogen 1 bis 5,8 µg/l (insgesamt 8 positive Nachweise).

#### 3.2.2.2 Oberflächengewässer

Auf der o. g. kanadischen LAW 66-Schießbahn wurden Wasserproben eines periodisch Wasser führenden Baches entnommen. Er entspringt am Hang hinter dem Ziel in unmittelbarer Nähe zur Abschussstelle und versickert in einem Schotterbett am Fuß des Hügels. In Bodenproben aus dem Zielgebiet, die mit unterschiedlichen Probenahmestrategien entnommen worden waren, bildete Oktogen mit Werten von 10 bis 1.200 mg/kg die Hauptkontaminante. TNT und NG schwankten von < NWG bis 10 mg/kg, Hexogen von < NWG bis 5 mg/kg. Oktogen, TNT und Hexogen lagen in den Wasserproben in Konzentrationen von 130, 1,6 und 2,4  $\mu$ g/l vor und sind auch im Grundwasser vorhanden (siehe Kap. 3.2.2.1). NG war nicht nachweisbar.

Drei Oberflächenwasserproben wurden auch auf der kombinierten Panzer- und MG-Schießbahn *CFB Petawana* (Ontario, Kanada) entnommen; hier wird ebenfalls mit der LAW66 geübt. Zwei Proben wurden aus einem kleinen Bach auf der Range, eine weitere aus einem Teich in der Nähe eines MG-Schießplatzes entnommen. Der Bach hat seinen Ausgangspunkt in mehreren Quellen in der Nähe der Feuerstellung der Schießbahn. Bodenproben in unmittelbarer Nähe zur Feuerstellung hatten 2.500 mg/kg Oktogen und 27 mg/kg NG enthalten. In zwei Wasserproben in 100 und 500 m Entfernung vom Ziel war Oktogen (1,9 / 0,5 μg/l) nachweisbar. Die Probe aus dem Teich war negativ.

#### 3.2.2.3 Explosionstrichter

Auf einer Schießbahn für Panzerabwehrwaffen auf der *CFB Gagetown* wurden Oberflächenwasserproben aus Eintiefungen vor den Zielobjekten entnommen, die der Feuerstellung am nächsten lagen. Zwei der dort am häufigsten verwendeten Munitionstypen sind die LAW66 und die 84 mm Panzergranate. Sechs Proben wurden aus drei Geländeeintiefungen entnommen, die stagnierendes Wasser enthielten. Bei zwei Probenahmestellen handelte es sich um Gräben, die sich durch den Beschuss gebildet hatten. Die dritte Vertiefung, vermutlich aus einer Vor-Ort-Sprengung eines Blindgängers entstanden, lag etwa 20 m von einem Zielobjekt entfernt. Der Boden im Umfeld der Ziele war übersäht mit Splittern und Treibmittel-Bruchstücken. Der Boden im Umfeld der Vertiefungen wies folgende Feststoffgehalte auf: Oktogen 50 bis 1.000 mg/kg, NG 2 bis 80 mg/kg; TNT und Hexogen < 1 mg/kg. Alle Wasserproben und Sedimentproben enthielten Oktogen und Nitroglyzerin, was angesichts der Hauptkontaminanten im Boden plausibel erscheint. Die Wasserproben stammen von unterschiedlichen Stellen der Vertiefungen und wiesen auch unterschiedliche Konzentrationen an STV auf (Vertiefung 1: Oktogen 26, 19 und 570 µg/l; NG 2,1, 33 und 1.800 µg/l; Vertiefung 2: Oktogen 59 und 73 µg/l; NG 42 und 65 µg/l).

TNT war in nahezu allen den Sedimentproben nachzuweisen, wenngleich in deutlich niedrigeren Konzentrationen als Oktogen oder NG, die in stark schwankenden Konzentrationen vorlagen. Zusammenfassend können in einem Explosionstrichter nach Ansicht der Autoren sowohl im Sediment als auch im(Stau-)Wasser sehr unterschiedliche Konzentrationen vorliegen. Die Autoren führen dies auf Sprengstoffbrocken im Boden und einen geringen Wasseraustausch in den Explosionstrichtern zurück.

Diese Ergebnisse sind auch für die Untersuchung von Schichtwasser aus Trichtern von Interesse. Je nach Entnahmestelle ist auch hier mit unterschiedlichen Konzentrationen zu rechnen. Wenn möglich bzw. sofern der Schürfaufschluss es erlaubt, sollte im Rahmen einer Beprobung an mehreren Stellen Wasser entnommen und hieraus eine Mischprobe gebildet werden.

#### 3.2.3 Spreng- und Brandplätze

Auf dem Spreng- und Brandplatz des kanadischen Munitionsdepots (CFAD) Dundurn bestehen 30 Grundwassermessstellen. Bei mehrfachen Beprobungen hatten sich drei als Hexogen-belastet erwiesen. Die Konzentrationen schwankten von 6,6 bis 160 µg/l. Weitere Ergebnisse liegen zu diesem Standorttyp nicht vor.

#### 3.2.4 Resümee

Die Autoren des Projekts ER-1155 stellen fest, dass Explosivstoffe sich über die ursprünglichen Eintragsstellen hinaus durch Migration ausbreiten und in Quellen sowie im Grundwasser im Abstrom auftreten können. Die Konzentrationen im Grundwasser stehen oft mit Bodenbelastungen in der Umgebung in Zusammenhang. Die nachgewiesenen Parameter hängen vom Schießbahntyp ab. Hexogen tritt am häufigsten im Oberflächen- und Grundwasser von Zielgebieten und Sprengplätzen auf. Oktogen dominiert auf Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen. TNT ist in der Regel in niedrigeren Konzentrationen als Hexogen vorhanden. TNT unterliegt im Boden in wesentlich stärkerem Maß einer Verringerung (durch Abbau und Bindung) als Hexogen oder Oktogen.

Die Informationen über das Grundwasser – so schränken die Autoren ein – sind sehr begrenzt und liegen meist nur für kanadische Liegenschaften vor. Die Aussagen sind möglicherweise nur mit Einschränkungen auf US-Liegenschaften übertragbar. Eine erhöhte Aussagekraft der Daten ist nach Ansicht der Autoren nur durch ein systematischeres und ausgedehnteres Grundwasseruntersuchungsprogramm möglich. Bei den Liegenschaften, die im Rahmen der ER-1155-Studie überprüft wurden, ist die Mehrzahl der Grundwasseraufschlüsse ohne STV-Nachweis. Werden Kontaminationen festgestellt, so dominiert stets Hexogen. Die Konzentrationen liegen in der Regel im Bereich einiger  $\mu g/l$ . Spreng- und Brandplätze, bilden eine Ausnahme, da hier üblicherweise höhere Konzentrationen feststellbar sind. In Oberflächengewässern wie Seen, Teichen, Flüssen und Bächen auf oder in der Nähe von Schießbahnen konnten nur sehr vereinzelt Nachweise geführt werden. Die Konzentrationen liegen hier in der Regel im Bereich weniger  $\mu g/l$ . Trotz der niedrigen Werte belegen die Ergebnisse, dass eine Ausbreitung mit dem Oberflächenwasserabfluss und mit dem Grundwasser prinzipiell stattfinden kann. Stehendes Wasser in Explosionskratern enthält sehr häufig gelöste Explosivstoffe und kann daher eine punktförmige Eintragsquelle darstellen.

Sprengplätze sind demnach die am stärksten belasteten Standorttypen auf US-Übungsplätzen; das Grundwasser ist hier in der Regel kontaminiert. Dies stützt die Aussage im Anhang 2.1, dass bei den vorherrschenden hydrogeologischen Rahmenbedingungen auf Sprengplätzen von Verunreinigungen des Grundwassers auszugehen ist. Darüber hinaus sind deutsche Nachkriegssprengplätze vom Gefährdungspotenzial kritischer zu bewerten, da der Munitionsumsatz höher war.

Oberflächengewässer scheinen nur in Ausnahmefällen Kontaminationen aufzuweisen z.B. wenn abfließendes Wasser aus den Schießbahnbereichen in diese Gewässer gelangt. Die US-Verhältnisse sind somit nicht direkt auf Nachkriegssprengplätze übertragbar.

# 3.3 Versuche zur Bestimmung der bei Sprengungen verbleibenden Rückstände

LAYTON et al. waren 1986 die ersten, die die damals noch spärlich vorhandene Literatur hinsichtlich der Rückstände bei Sprengungen auswerteten. [256]. Sie zitierten HOWES et. al., die bei Sprengversuchen mit diversen Munitionstypen in flachen Gruben feststellten, dass der Sprengstoffumsatz generell als "nicht vollständig" bezeichnet werden kann. Sie verweisen ebenfalls auf NEWELL (1984), der Bodenrückstände auf modernen US-

Sprengplätzen prüfte. Er fand heraus, dass 70% der Bodenproben keine Explosivstoffe enthielten. TNT war lediglich in 22 % der Proben nachweisbar, nur in 1% der Proben lagen die Konzentrationen über 1g/kg. LAYTON, wertete die Ergebnisse unter der Annahme, dass die Proben jeweils nur einer einzigen Sprengung ausgesetzt waren, aus und schätzte ab, dass etwa 4% der Füllung bei der Detonation nicht umgesetzt werden. Der Autor analysiert jedoch die Ursachen für die Bildung der Rückstände nicht weiter. Seit NEWELL und LAYTON hatte sich in den USA niemand mehr systematisch mit Sprengstoffrückständen beschäftigt.

Die Ergebnisse der Standorterkundungen im Rahmen des ER-1155-Projekts deuteten darauf hin, dass nicht so sehr der reguläre Verschuss sondern vor allem die unvollständige Detonation oder die nicht bestimmungsgemäße Sprengung eines Kampfmittels ein signifikanter Faktor für die Bildung von Rückständen sein kann. Dieser neue Ansatzpunkt sollte im Rahmen des ER-1155-Projekts durch Sprengversuche mit Rückstandsbestimmungen detailliert untersucht werden. Die Versuche wurden meist auf Schnee bedeckten Schießbahnen durchgeführt. Diese von JENKINS ersonnene Methode bot drei wesentliche Vorteile:

- Eine frische Schneeoberfläche ist stets unkontaminiert,
- die Ausdehnung der Rückstände zeichnet sich auf der Schneeoberfläche durch die Bildung eines Rußsaums ab und
- die repräsentative Beprobung und Analyse des Schnees ist einfach und liefert deutlich belastbarere Ergebnisse als die Untersuchung von Bodenmaterial.

Parallel wurden auch Versuche durchgeführt, bei denen die zu sprengende Munition in einen Eimer mit Sand gelegt wurde und der Eimer in erhöhter Position in der Mitte einer auf dem Boden ausgebreiteten Plane gesprengt wurde. Zu Untersuchung wurde der Sand eingekehrt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Sprengversuche zusammenfassend betrachtet.

#### 3.3.1 Rückstände von Kampfmitteln nach Verschuss

Die getesteten Munitionstypen waren [109, 111, 210, 211 u. a.]

- > 60, 81 und 120 mm Mörsergranaten,
- > 40 mm Gewehrgranaten,
- > 105 mm Sprenggranaten,
- > 155 mm Haubitzgranaten und
- > Handgranaten.

Zunächst war festzustellen, dass sich nach dem Einschlag bzw. der Umsetzung sehr unterschiedlich große und unterschiedlich geformte Rußniederschlagsbereiche bildeten. Die maximale Entfernung vom Detonationspunkt bzw. vom Krater, in der noch Rußniederschlag erkenntlich war, betrug knapp 10 m. Die Größen der umsäumten Flächen schwankte von < 100 m² bis > 2.000 m² [425].

Der Gesamtrückstand pro Stück gesprengter Munition lag, je nach Größe der ursprünglichen Ladung, im µg- bis mg-Bereich. Zusammenfassend stellen die Autoren fest, dass sich bei einer High-Order-Detonation durchschnittlich 99,997% der ursprünglichen Füllung umsetzen. Bei bestimmungsgemäßer Funktion (detonation as designed) verbleiben demnach nur minimale Rückstände. Dies deckt sich mit den Feldbeobachtungen, wonach signifikante Belastungen auf Schießbahnen nur im direkten Umfeld von Low-Order-Detonierern gemessen werden konnten. Die Ergebnisse der Sprengversuche sind in den Tab. 2 und Tab. 3 zusammengestellt.







Abb. 13: oben: 60 mm Wurfgranate (Modell); Mitte 81 mm Wurfgranate (TNTgefüllt); unten 105 mm Sprenggranate ohne Zünder (Blindgänger).

### 3.3.2 Rückstände von Schlagladungen

Die Detonation ist nach Ansicht der Autoren ein komplexes Phänomen, das von Faktoren wie der Größe und der Form der Hauptladung, der Position und der Ausrichtung des Detonators, den Eigenschaften und der Größe der eingesetzten Schlagladung und sogar den Wetterbedingungen zum Zeitpunkt der Detonation abhängt. Um die Zusammenhänge besser verstehen zu können, wurden im Rahmen des ER-1155-Projekts Versuche mit nicht eingehüllten Ladungen aus C4, TNT, Comp. B, Oktol, PBX (Plastic Bound Explosive) und XRT (Experimental Rubbery TNT) durchgeführt. Diese Tests stellen im Grunde einen worst case dar, da sich ohne Hülle kein Druck aufbaut und keine hohen Temperaturen erreicht werden. Ziel der Sprengversuche war es,

- > die Rückstandsmengen sowie
- die Beziehung zwischen der Größe einer Ladung und den erzeugten Rückständen bei der Detonation zu ermitteln
- > und zu bestimmen, ob die Form der Ladung einen Einfluss auf Menge und Verteilung der Rückstände hat.

Es stellte sich heraus, dass die Gesamtrückstände im Allgemeinen niedrig waren. Die Maximalwerte bezogen auf die Ausgangsladung betrugen 3,4% TNT, 19% Hexogen und 2,8% Oktogen. Die Medianwerte waren jedoch wesentlich niedriger: TNT 0,006%; Hexogen 0,02%, Die Oktogen-Rückstände waren vernachlässigbar gering. Größere Ladungen hinterließen oft geringere Rückstandsmengen; PBX und Comp. B generierten mit 26 bzw. 13 mg die größten Rückstandsmengen.

Alle anderen Ladungen lagen unter 10 mg. Auf Grundlage der Hexogen-Rückstände bei C4-Detonationen erzeugen Kugeln die geringsten Rückstände (durchschnittlich 1,8 mg; Medianwert 1,2 mg), gefolgt von Zylindern (durchschnittlich 5,0 mg; Medianwert 1,8 mg) und Blöcken (durchschnittlich 140 mg; Medianwert 9,5 mg).

Das *CRREL* führte mehrere Sprengversuche mit C4 auf *Camp Ethan Allen* (Vermont) und *Fort Ri-chardson* (Alaska) durch. Die Umsetzungsraten waren im Allgemeinen auch hier größer als 99,9 %.

Tab. 2: CRREL-Rückstandsbestimmungen nach Verschuss (live fire). Alle Granaten waren, soweit nicht anders angegeben, mit Comp. B gefüllt [208], verändert.

	Anzahl	Spreng	Hauptkon-	durchschnittl. Rück-			STV-
Ort / Jahr	der					Rückstand	
511, Gaill	Spren- gungen	menge [g]	onsbereich, Fläche [ m² ]	RDX	НМХ	TNT	[%]
60 mm Mörser							
Fort Drum, NY / 2000	2	373	80	0,21	0,008	0	0,000058
Ethan Allen, VT / 2001	5	373	21	0,074	0,019	0,014	0,000029
Fort Richardson, AK / 2006	7	373	214	0,073	0	0	0,00002
Mittelwert				0,093	0,008	0,005	0,000028
81 mm Mörser							
Fort Richardson, AK / 2002	14	953	128	8,5	0	1,1	0,001
120 mm Mörser	120 mm Mörser						
Ethan Allen, VT / 2001	7	2990	720	4,2	0,28	0,33	0,00016
Fort Richardson, AK / 2005	10	2990	409	17	1,3	2,6	0,0007
Mittelwert			537	12	0,9	1,7	0,00048
105 mm Artillerieg	105 mm Artilleriegranate						
Fort Richardson, AK / 2002	13	2086	480	0,095	0	0,17	0,000013
155 mm Artilleriegranate							
Donelly, AK / 2005	7	6622	575	0	0	0	0
Donelly, AK / 2005	7	6985	938	0,3	0	0,009	0,0000044
Mittelwert			848	0,15	0	0,005	0,0000022

Tab. 3: Berechnete Hexogen- und TNT-Rückstandsmengen (in Klammern die Standardabweichung) pro Munitionstyp nach Verschuss (live fire) [208], verändert.

Waffengattung	Anzahl der Sprengungen	durchschnittl. Rückstand, geschätzt [ mg ]			
		RDX	TNT		
60 mm Mörser	14	0,093	0,005 <sup>1)</sup>		
81 mm Mörser	14	8,5	1,1		
120 mm Mörser	17	12	1,7		
105 mm Haubitze	13	0,095	0,17		
155 mm Haubitze (TNT)	7	0	0		
155 mm Haubitze (Comp. B)	7	0,3	0,009		
40 mm Gewehrgranaten	3	1,61 (1,7)	0,0052 (0,0036)		
M67 Handgranaten	7	0,025 (0,016)	n.n.		
Landminen	8	16 (1,6)	k.A.		

<sup>1)</sup> Eine Probe nicht untersucht, n für TNT=13

# 3.3.3 Rückstände nach Sprengung von Kampfmitteln

#### 3.3.3.1 60 mm Wurfgranaten

Mit 60 mm-Granaten (Füllmenge 351 g TNT) wurden drei Experimentreihen durchgeführt, teils auf schneebedecktem Gelände (*CFB Valcartier*, Kanada), teils fanden auch Auffangbleche Verwendung (*CFB Valcartier* and *Redstone Arsena*l, Alabama).

In *Valcartier* wurde zur Simulation des "natürlichen" Verschusses zunächst eine relativ kleine Initialladung (50 g C4) in die Zünderbuchse gesteckt. Die übliche BIP-Praxis wurde nachgestellt, indem man einen C4-Block direkt auf der Granate fixierte. Die beiden Versuche ergaben jedoch kaum Unterschiede bei den Rückstandsmengen. Der Nachweis von RDX, TNT (einschl. Metaboliten) und HMX lag unter 0,2% der ursprünglichen Füllmenge der Granate. HMX wurde nicht in signifikanten Mengen nachgewiesen. RDX stammt aus der unvollständigen Umsetzung des C4, da die eigentlichen Sprengobjekte mit TNT gefüllt waren.

Die sich anschließenden Versuche mit Auffangblechen verglichen BIP-Rückstände bei Verwendung von C4-Blöcken, (gewerblichen) Hohlladungen und dem binärem Sprengstoff *FIXOR* miteinander.

FIXOR besteht aus einer brennbaren Flüssigkeit und einem inerten Puder. Die drei gewerblichen Hohlladungen (6,5 g, 16,5 g und 36 g) und das militärische C4 in Form der linearen M7-Hohlladung bestehen aus Hexogen. Mit Ausnahme eines Versuchs mit C4 in der Granatenspitze wurden die 50, 100 und 150 g großen C4-Ladungen stets seitlich am Granatkörper fixiert. Die Granaten waren teils bezündert, teils unbezündert. Die Rückstände wurden mittels 1x1 m großen Blechen aufgefangen, die um die Sprengplatte angeordnet waren.



Abb. 14: C4-Block (M112 Demolition Charge; hier in einer Nachbildung).



Abb. 15: (gewerbliche) Zerstörladung (D) (Hohlladung).

Die Druckmessgeräte zeigten an, dass sechs der 14 Detonationen "low-order" verliefen. Hieraus war abzuleiten, dass mindestens 150 g C4 in Kontakt mit der Hülle oder eine 16,5 g Hohlladung für die wirksame Vernichtung dieses Granatentyps erforderlich sind. Die Rückstandsmengen bei den High-Order-Detonationen mit 150 g C4 betrugen weniger als 0,2 g. TNT. Die Rückstandsmengen für die Low-Order-Umsetzungen bei Verwendung von lediglich 75 g oder 100 g C4 bzw. bei der Umsetzung mit 50 g C4 in der Spitze der Granate erstreckten sich von 0,6 bis 9,5 g TNT. Die High-Order-Detonationen mit 16,5 und 36 g Hohlladungen hinterließen als Rückstand 0,5 g TNT; die Low-Order-Umsetzung mit 6,5 g Hohlladung 4,7 g TNT. Die Umsetzung mit FIXOR erzeugte Restmengen von 0,25 und 1,25 g TNT. Die Konzentrationen an Hexogen waren im Allgemeinen sehr niedrig (µg bis wenige mg). HMX wurde selten und allenfalls in sehr geringen Konzentrationen nachgewiesen. Die Verteilung mit der Entfernung um die Sprengstelle war heterogen und widersprüchlich.

Ziel weiterer Tests war die Optimierung der Vor-Ort-Sprengungen. Es sollte ermittelt werden, welche der vier Schlagladungen die höchste Umsetzungsrate erzielt. Eine bezünderte 60 mm Granate, die mit Composition B gefüllt war, diente als Vernichtungsobjekt. Die Autoren verglichen hierbei folgende Schlagladungen:

- ➤ Hohlladung (30 g RDX)
- > C4-Block (0,567 kg aus 91% RDX, 5,3% Weichmacher, 2,1% Bindemittel, 1,6% Petroleumöl)
- > TNT-Block (0,454 kg)
- Binärer Sprengstoff (Trägermaterial aus 99-100% Ammoniumnitrat; Aktivierer aus 95-100% Nitromethan)

Die Versuche fanden in einem Stahleimer statt, der mit sauberem Sand gefüllt war. Unter dem Eimer lag eine Plane, um die Wiedergewinnung der Rückstände zu erleichtern. Der Sand wurde in konzentrischen Kreisen im Abstand von 3, 6, 9, 12 und 15 m um das Detonationszentrum zusammen gekehrt. Der Sand jedes Kreises wurde in einem Zementmischer sorgfältig vermischt und anschließend beprobt. Jeder Munitionstyp wurde mit jeder Schlagladung in siebenfacher Ausfertigung umgesetzt.



Abb. 16: Sprengblock und Auffangbleche (witness plates); CFB Valcartier.

Als am effektivsten erwies sich bei diesen Versuchen der binäre Sprengstoff, bei dem keine Rückstände verblieben. Alle anderen Schlagladungen hinterließen pro Sprengung RDX-Mengen im mg-Bereich und TNT-Mengen im µg bis mg-Bereich, wobei C4 die geringsten und TNT die größten Rückstandsmengen erzeugte. In der Verteilung der Rückstände mit zunehmender Entfernung war, wie bereits bei den Versuchen auf *CFB Valcartier*, wiederum kein eindeutiger Trend zu erkennen.

### 3.3.3.2 81 mm Wurfgranaten

Die Bestimmung der Rückstände bei 81 mm Wurfgranaten, die mit 416 g RDX, 57 g HMX und 343 g TNT gefüllt sind, erfolgte in sechs Versuchsreihen. Zwei Schnee-Versuche liefen auf *Camp Ethan Allen* (Vermont), einer auf *Fort Richardson* (Alaska), zwei auf der *CFB Valcartier* (Quebec; Kanada; auf Schnee bzw. mittels Auffangblechen). Die letzte Versuchsreihe fand mit Sand und Auffangblechen auf dem *Redstone Arsenal* (Alabama) statt.

Auf *Camp Ethan Allen* wurde ein Versuch mit drei bezünderten 81 mm Wurfgranaten (Typ M374) und ein Versuch mit einer einzelnen bezünderten M374 Wurfgranate durchgeführt. Sie wurden jeweils mit einer Schlagladung aus einem C4-Block (Typ M112), der an der Seite der Hülle fixiert war, zur Umsetzung gebracht. Im ersten Test betrug die Rückstandmenge an RDX 42 mg, im zweiten 14 mg. An HMX verblieben 6,8 bzw. 3,4 mg; an TNT 0,3 bzw. 0,081 mg.

Auf *Fort Richardson* wurden sieben bezünderte M374 Wurfgranaten auf schneebedecktem Eis gesprengt. Die Abschätzungen der Rückstandsmengen ergaben 130 mg Hexogen, 23 mg HMX und wiederum kein TNT.

Die Versuche auf Schnee in Valcartier wurden mit entfernter Treibladung und ausgebautem Zünder

ausgeführt. Die Schlagladungen waren C4-Blöcke aus 60 bzw. 150 g, und 40 g, die in der Zünderbuchse platziert wurden. Es konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen der verwendeten Menge an C4 und den Rückstandsmengen ermittelt werden. Die Rückstandsmengen betrugen für RDX 0,0022% (11 mg) und für TNT 0,026% (88 mg).

In identischer Weise wurden 81 mm Granaten, teils mit teils ohne Zünder, für die Valcartier-Versuche mit den Auffang-Blechen verwendet. Zur Initiierung der Detonation dienten Blöcke aus C4 (100 und 150 g), Hohlladungen (je eine Sprengung mit linearer M7 Hohlladung sowie 6,5, 16,5 und 36 g Hohlladungen) und der binäre Sprengstoff *FIXOR* (zwei Sprengungen). Die Blöcke wurden wiederum längs an die Granaten gelegt mit Ausnahme von vier Versuchen, bei denen je ein 75 g C4-Block in die Spitze gesteckt wurde.

Die Rückstände bei Verwendung von C4 betrugen durchschnittlich 900 mg RDX und 1.200 mg TNT. Hierbei sind zwei mögliche Low-Order-Umsetzungen enthalten. Die gebildeten Mengen standen erneut in keinem Zusammenhang zur Größe der eingesetzten Schlagladung. Die Rückstände, die bei Verwendung von *FIXOR* gebildet wurden, waren mit denen bei Verwendung von C4 vergleichbar. Die lineare Hohlladung brachte die größten Rückstandsmengen hervor (18 g RDX, 12 g TNT, 1,1 g HMX). Obwohl nur wenige Daten vorlagen zeichnete sich nach Ansicht der Autoren ab, dass mit zunehmender Größe der Hohlladung die Rückstandsmengen abnahmen.

Die unbezünderten (jedoch mit Schutzkappe versehenen) 81 mm Granaten wurden bei den Versuchen auf dem *Redstone Arsenal* mittels Zündschnur und je zwei Zündhütchen und M14 Sprengkapseln umgesetzt. Die Annordnung der übrigen Versuche mit 81 mm Granaten entsprach der Anordnung, die bei Sprengung der 60 mm Granaten auf dieser Liegenschaft gewählt worden war.

Die 81 mm Granate erzeugte in dieser Versuchsreihe überraschenderweise mehr Rückstände als alle anderen getesteten Kaliber (60, 105 und 155 mm). Die Hohlladung erwies sich hierbei als die effektivste Schlagladung. Es verblieben lediglich Rückstände in der Größenordnung von µg bis wenigen mg. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Schlagladungen waren signifikant für

- > HMX (C4, Binärer Sprengstoff > TNT, Hohlladung),
- > für RDX (C4 > TNT > Hohlladung; binärer Sprengstoff > Hohlladung) und
- > für TNT (TNT, C4, Binärer Sprengstoff > Hohlladung).

Die binäre Schlagladung, die sich bei den 60 mm Granaten als erfolgreich erwiesen hatte, produzierte bei den 81 mm Granaten signifikante Mengen an RDX. Die C4-Schlagladung produzierte Restmengen von 15,1 +/- 21 mg<sup>4</sup> TNT und 46,8 +/- 45,9 mg RDX. Wie bereits bei den 60 mm Granaten beobachtet, hinterließ auch die TNT-Schlagladung STV-Mengen im mg-Bereich.

Es ist nicht auszuschließen, dass die Ergebnisse von einem weiteren Faktor (wie z. B. der Güte oder dem Alter des Sprengstoffs oder dem Füllwerk) überlagert werden, sodass keine plausiblen Zusammenhänge zu erkennen sind. Es ist jedoch auch möglich, dass die Bildung von Rückständen in diesem Größenbereich keinen festen Gesetzmäßigkeiten unterliegt. Dies scheint vor allem bei dem binären Sprengstoff der Fall zu sein. Es ist denkbar, dass die Versuche nicht mit statistischer Signifikanz reproduzierbar sind. Trotzdem geben sie zumindest wichtige Anhaltpunkte dafür, in welcher Größenordnung mit Rückständen bei der (Einzel-) Sprengung von Munition zu rechnen ist.

#### 3.3.3.3 105 mm Sprenggranaten

Versuche mit diesen Kaliber haben die Autoren auf CFB Valcartier (Quebec), Fort Richardson (Alas-

-

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Die Angabe in dieser Form erscheint unverständlich.

ka) und dem Redstone Arsenal (Alabama) durchgeführt.

In *Valcartier* wurde ein mit Composition B gefülltes Geschoss mit C4 in der Zünderbuchse gesprengt, dabei blieben 24 mg RDX und 2.500 mg TNT übrig. Die Menge an TNT bewerten die Autoren mit ungewöhnlich hoch. Da jedoch nur ein Versuch ausgeführt wurde, können mögliche Schwankungen nicht abgeschätzt werden.

Auf *Fort Richardson* wurden sieben bezünderte M105-Granaten gesprengt. Sie waren mit Composition B gefüllt und hatten eine Aufladung aus 136 g TNT. Pro Granate verblieben 41 mg an RDX, 8,8 mg an HMX, jedoch kein TNT.

Die Versuche auf dem *Redstone Arsenal* (Alabama) wurden in gleicher Weise wie bei den 60 mm-Granaten ausgeführt. Es kamen jedoch eine 36 g Hohlladung und zwei statt einem Block TNT bzw. C4 zur Anwendung. Die mit Abstand größten Rückstandsmengen erzeugte die binäre Ladung. Die anderen Schlagladungen hinterließen vergleichbare, insgesamt niedrigere Rückstandsmengen. Anders als bei den Wurfgranaten erzeugte die TNT-Schlagladung keine nennenswerten TNT-Rückstände, jedoch Mengen an RDX im mg-Bereich. Die Hohlladung hinterließ lediglich 0,7 mg TNT, jedoch 17 mg Hexogen. Bei der Verwendung von C4 als Schlagladung blieben 28 mg RDX und 11 mg TNT pro gesprengter Granate übrig. Die binäre Schlagladung war für die 105 mm Granate zu klein und endete häufig in einer Low-Order-Detonation.

#### 3.3.3.4 155 mm Sprenggranaten

Die Versuche fanden auf *Camp Ethan Allen* (Vermont), *Fort Richardson* (Alaska) und auf dem *Redstone Arsenal* (Alabama) teils auf Schnee teils auf Planen statt.

Acht unbezünderte, TNT-gefüllte Granaten wurden auf *Camp Ethan Allen* an einer Kette etwa 1,3 m über der Schneeoberfläche aufgehängt. Zur Sprengung diente ein 0,57 kg schwerer C4-Block. In etwa 15 m Abstand wurden Aluminiumbleche in den vier Himmelsrichtungen platziert. Nach den sieben Detonationen wurden in der Regel 15 Schneeproben entnommen. Die beprobte Fläche spiegelt etwa 1 bis 2 % der von Niederschlag betroffenen Bereichs wider. Die Rückstandsmengen betrugen bei diesen Versuchen 20 +/- 38 g<sup>5</sup> TNT. Der Medianwert betrug 200 mg TNT (entspricht 0,003 % der ursprünglichen Füllung). Die Schwankungsbreite bei den Werten war außergewöhnlich hoch und umfasste fünf Zehnerpotenzen.

Auf *Fort Richardson* wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Zunächst wurden sieben bezünderte 155 mm-Granaten, die mit Composition B gefüllt waren, und sieben bezünderte Granaten, die mit TNT gefüllt waren, gesprengt. Die Granaten wurden dazu auf einen Eisblock gelegt und mittels C4-Block (0,57 kg), der in der Nähe des Zünders platziert war, initiiert. Die letzte Versuchsreihe untersuchte Composition B-Rückstände von 155 mm Granaten, bei denen die Anordnungen von Schlagladung und Kampfmittel variiert wurden. Drei Granaten wurden senkrecht mit der Spitze nach oben durch einen C4-Block gesprengt, zwei weitere wurden horizontal liegend mit zwei C4-Blöcken gesprengt. Eine Granate gelangte ohne Zünder durch einen C4-Block zur Sprengung.

Bei der ersten Versuchsreihe (Comp. B gefüllt) ergaben sich durchschnittliche Rückstände von 14 mg RDX (Medianwert 10 mg) und weniger als 1 mg HMX. TNT war nicht nachweisbar.

Bei den TNT-gefüllten Granaten ergaben sich Rückstände von durchschnittlich 6,5 mg RDX (Medianwert 5,9 mg) und 6,7 mg TNT (Medianwert 5,9 mg). Als Eintragsquelle für das RDX halten die Autoren den Zünder (21 mg RDX), den C4-Block oder beides für möglich. TNT-Partikel wurden sowohl innerhalb als auch außerhalb des Bereichs festgestellt, der von schwarzem Ruß umsäumt wird. Dies deck-

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Die Angabe in dieser Form erscheint unverständlich.

te sich mit den Feststellungen auf Camp Allen.

Die Versuche mit den verschiedenen Anordnungen der Granaten ergaben ähnliche Ergebnisse wie die erste Versuchsreihe. Die unterschiedliche Positionierung von Sprengobjekt und Schlagladung wirkt sich offensichtlich nicht auf die Höhe der Rückstandsmengen aus. Die unbezündert gesprengte Granate hinterließ jedoch größere Rückstände.



Abb. 17: Sprengversuch mit 155 mm Granate; Fort Richardson; horizontal; bezündert; eine Schlagladung am Zünder; Unterlage Eis.

Die Versuchsanordnung bei den 155-mm- Granaten auf dem *Redstone Arsenal* entsprach der Anordnung, die bei den 60 mm Granaten gewählt worden war. Es wurden jedoch nur die beiden Schlagladungstypen "zwei C4 Blöcke" und "Hohlladung 36 g" getestet. Die Granaten waren unbezündert und mit einer Haube versehen. Die C4-Ladung erzeugte weniger Rückstände als die Hohlladung, die Unterschiede waren nicht gravierend. Beide Ladungen erwiesen sich bei der 155 mm Granate effektiver als bei den beiden kleineren Versionen von 60 und 81 mm. Die wesentlich größere Füllung scheint den Umsatz während der Detonation und dem "Nachbrennen" zu begünstigen. Nahezu der gesamte Rückstand entfiel auf zwei der fünf Wiederholungssprengungen. Hierbei verblieben RDX und TNT, jedoch kein HMX. Die C4-Ladung erzeugte durchschnittlich 2,1 +/- 1,9 mg RDX und 0,045 +/- 0,028 mg TNT, die Hohlladung durchschnittlich 9,8 +/- 7,9 mg RDX und 11 +/- 9,3 mg TNT.

#### 3.3.3.5 Minen

Im Rahmen des ER-1155-Programms wurden Panzerminen, Claymore-Minen und Personenminen auf ihre Rückstände nach Sprengung untersucht.

Zwei M19 Panzerminen (0,53 kg Composition B) und eine M15 Panzermine (10 kg Composition B) wurden auf Schnee mit einem halben C4-Block gesprengt. Der geschätzte Rückstand betrug bei der M19-Panzermine 2,7 mg RDX (kein TNT), bei der M15-Panzermine 40 mg RDX und 0,076 mg TNT.

Auf Camp Ethan Allen wurden je zwei unbezünderte Minen der Typen PMA-1A (200 g TNT), PPM-2 (130 g TNT), PMA-2 (100 g TNT und 13 g RDX) und VS-50 (43 g RDX)gesprengt. Die Minen wurden unter einer 20 - 30 cm dicken Schneebedeckung zur Explosion gebracht, wobei entweder Sprengkapseln (PMA-1A, PMA-2) in der Zünderbuchse verwendet wurden, oder ein halber Block C4 (PPM-2, VS50). Die größten RDX-Rückstandsmengen hinterließ die VS-50 (100 / 170 mg), die größten TNT-Mengen die PMA-1A (280 / 1.100 mg) und die PPM-2 (1.100 / 7.900 mg).

In zwei Versuchsreihen auf CFB Valcartier wurden sieben PMA-2-Minen (Füllung hier 100 g TNT; kein RDX) und acht PMA-1A Minen mittels C4 (5 bis 30 g) vernichtet. Hierbei kamen verschiedenen Konfigurationen zur Anwendung. Die Rückstände für TNT lagen im g-Bereich. Die RDX-Restmengen aus

C4 waren großen Schwankungen unterworfen (n. n. - 990 mg).

Sieben Claymore-Minen, die mit 0,68 kg Comp. B gefüllt sind, wurden auf Camp Ethan Allen mittels Zeitzünder gesprengt. Es verblieben rund 16 mg RDX (dies entspricht rund 0,002 % der ursprünglichen Füllung).



Abb. 18: Eine Claymore-Mine wird scharf gemacht.

#### 3.3.3.6 Bangalore-Torpedos

Bangalore-Torpedos dienen zur Zerstörung von Stacheldraht und enthalten 4,86 kg Composition B. Auf verschiedenen Liegenschaften wurden 8 Torpedos mit Zeitzünder gesprengt. Die Rückstände an RDX betrugen 110 bzw. 90 mg. TNT wurde nur bei einer Sprengung nachgewiesen (0,15 mg).

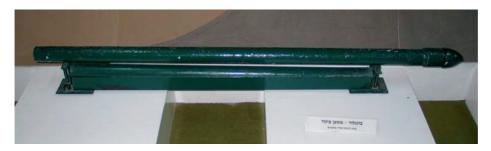


Abb. 19: Bangalore Torpedo (Batey ha-Osef museum, Israel.

## 3.3.3.7 Handgranaten

Bei verschiedenen Versuchen wurden insgesamt 13 Handgranaten vom Typ M67 gesprengt. Sie enthalten 185 g Comp. B. Die Rückstände wurden mittels Auffangblechen gesammelt. Nur eine Detonation setzte relativ hohe TNT-Mengen (306 mg) frei, während die anderen für TNT und RDX unter 40 mg lagen. Es verblieben demnach durchwegs weniger als 0,01% der Füllung als Rückstand.

#### 3.3.4 Rückstände nach kontrollierter Low-Order-Sprengung

Kontrollierte Low-Order-Sprengungen wurden auf einem erhöhten Tisch durchgeführt, der im Zentrum einer Plane stand. Hierbei fanden vier 60 mm, drei 81 mm und vier 120 mm Wurfgranaten Verwendung sowie fünf 105 mm und sieben 155 mm Sprenggranaten. Mit Ausnahme der 105 mm Sprenggranaten, deren Füllung nur zu 50% umgesetzt werden sollte, hatten alle Sprengungen das Ziel, 75 % der Füllung umzusetzen.

Ein signifikanter Zusammenhang von zunehmenden Rückständen bei abnehmender Initiierungsenergie war allerdings nur bei den 155 mm Granaten feststellbar. Die Rückstandsmengen waren in den ersten drei Metern um den Tisch normalerweise klein. Die Verteilung mit zunehmendem Abstand war bei den kleineren Granaten relativ einheitlich, während bei den größeren Granaten tendenziell ein Maximum im Abstand von 6 bis 9 m erreicht wurde. Die Autoren empfehlen deshalb für die Sanierung einer Low-Order-Detonation einen Radius von 15 m.

Das ursprüngliche Verhältnis von TNT zu RDX bildete sich auch im Rückstand ab. Allerdings zeigte das Verhältnis in der Fraktion < 0,25 mm deutlich weniger TNT, als es für Composition B typisch ist. Diese Reduktion des TNT-Anteils ist nach Ansicht der Autoren auf den wesentlich niedrigeren Schmelzpunkt von TNT (80°C) gegenüber dem von RDX (205°C) zurückzuführen, zudem ist geschmolzenes TNT auch detonationsempfindlicher (rascher umsetzbar) als festes TNT.

Außer TNT und RDX wurde bei allen Detonationen HMX , eine Verunreinigung des RDX nachgewiesen. Die Konzentrationen weiterer STV wie z.B. 2-A,4,6-DNT, MNX, 2,4-DNT, und die beiden Photolyse-Abbauprodukte des TNT, 1,3,5-TNB und 1,3-DNB, die sich wahrscheinlich während der Probenahme gebildet hatten, lagen nur im mg/kg-Bereich. Als Quelle von 2,4-DNT kommen Aufladungen oder Zusatzladungen in bestimmten Granaten in Frage. Eine weitere Quelle kann nach Ansicht der Autoren auch eine Verunreinigung des TNT mit 2,4-DNT sein.

#### 3.3.5 Resümee

Die Ergebnisse der Sprengversuche sind in der Tab. 4 zusammengestellt. Nach Ansicht der Autoren ist darauf zu achten, dass bei der Vernichtung von Blindgängern High-Order-Detonationen erreicht werden, indem ausreichend großen Schlagladungen zur Anwendung kommen. Während die Rückstände beim Verschuss nur im Bereich von wenigen µg pro Geschoss liegen, verbleiben bei einer Low-Order-Detonation sehr große STV-Mengen. RDX herrscht als Rückstand bei der Vor-Ort-Sprengung von Composition B gefüllter Munition vor. C4-Sprengstoff hinterlässt selbst bei High-Order-Detonationen nennenswerte Rückstände an RDX. Die Autoren nennen den unvollständigen Sprengstoffumsatz des C4 oder die Aufladung im Zünder als mögliche Quellen. Minen, Torpedos und Handgranaten hinterlassen bei der Vor-Ort Sprengung große Restmengen an STV im Bereich von mg bis g, abhängig vom Ausgangsgehalt. Im Regelfall spiegelt sich bei der Vernichtung von Composition B das ursprüngliche Verhältnis in den Rückständen wider.

Die Autoren legen nahe, munitionsspezifische Anweisungen zu erarbeiten, die garantieren, dass sowohl die Schlagladung als auch die Ladung des Blindgängers vollständig umgesetzt werden, müssen erarbeitet werden. Sie empfehlen, wo immer möglich, Schießbahnen von Munitionsteilen zu räumen, Sprengstoffbrocken zu sammeln und geeignet zu vernichten.

Die Ergebnisse der beschriebenen Sprengversuche sind nur eingeschränkt auf das Szenario der Massensprengplätze übertragbar. Von Bedeutung kann jedoch sein, dass bei Sprengstoffmischungen von TNT und RDX relativ große Mengen an RDX als Rückstand verbleiben, während TNT umgesetzt wird. Findet RDX als Schlagladung Anwendung, so scheinen ebenfalls generell Rückstände zu verbleiben.

Es ist möglich, dass die US-Truppen bei den Massensprengungen nach dem 2. Weltkrieg vorrangig Hexogen als Schlagladung verwendeten. Auch die StEG hat TNT in der Endphase der Sprengungen durch das RDX-haltige

Trialen ersetzt, das aus der Entlaugung amerikanischer Bomben gewonnen wurde. Das heutige RDX-dominierte Schadensbild auf Sprengplätzen in Deutschland kann vor diesem Hintergrund plausibel erklärt werden.

Die Ergebnisse der Sprengversuche können auch dahin gehend interpretiert werden, dass Munition mit kleineren Füllmengen (wie z. B. Personenminen) relativ große Rückstände generieren während größere Granaten vollständiger umsetzen. Dieser Zusammenhang ist auch für Sprengplätze in Betracht zu ziehen, die von einem hohen Anteil an vernichteter Kleinmunition gekennzeichnet sind.

Tab. 4: Rückstände nach Sprengung von Munition (Blown in Place) und von Schlagladungen (Demolition / Donor Charges) [208], verändert.

Ort / Jahr	Anzahl der Spren- gungen	Spreng- stoff- menge	Hauptkontami- nations- bereich,	R ges	rchschn lückstan chätzt [	d, mg ]	STV-Rück- stand [ % ]
		[g] <sup>1)</sup>	Fläche [ m² ]	RDX	HMX	TNT	
60 mm Mörse			I		ı	ı	
Ethan Allen, VT / 2000	3	1523	104	42	6,8	0,3	0,0032
Ethan Allen, VT / 2001	1	1523	295	14	3,4	0,081	0,0011
Fort Richardson, AK / 2004	7	1523	820	130	23	0	0,01
Mittelwert		1523	577	95	17	0,089	0,0074
Ethan Allen, VT / 2002 2)	7	7192	381	0	0	20	0,28
Fort Richardson, AK / 2004	7	7555	1620	15	1	0	0,00021
Fort Richardson, AK / 2004 <sup>2)</sup>	7	7192	1970	4,7	0,21	14	0,00026
Fort Richardson, AK / 2004	7	7555	1010	19	4,1	0	0,00031
Mittelwert			1533	13	1,8	4,7	0,00026
	Schlagladungen						
C4 (Hexogen)	1						
Ethan Allen, VT / 2001	1	570	150	61	26	0	0,015
Ethan Allen, VT / 2002	4	570	151	12	4,3	0	0,0029
Ethan Allen, VT / 2002	3	570	152	4,5	2,6	0	0,0012
Fort Richardson, AK / 2004	3	570	103	4,8	10	0	0,0026
Mittelwert			138	12	7,4	0	0,0035

<sup>1)</sup> einschließlich Initialladung

# 3.4 Laborversuche im Rahmen des ER-1155-Projekts

# 3.4.1 Bestimmung der Transportparameter ausgewählter sprengstofftypischer Verbindungen

Bereits in den 90er Jahren hat das *Environmental Laboratory* für die Hauptsprengstoffe TNT, RDX und HMX die Parameter untersucht, die den Transport in der Umwelt charakterisieren: Löslichkeit, Lö-

<sup>2)</sup> Sprengladung aus TNT

sungsverhalten, Verteilung in den Medien Boden und Wasser sowie Abbauverhalten. Eine Darstellung des Kenntnisstands zu Beginn des Projekts ER-1155 findet sich bei BRANNON, J. M. et Myers, T. E. [146]. Im Rahmen des ER-1155 wurden Laborversuche zur Bestimmung der Transportparameter von Sprengstofftypischen Verbindungen durchgeführt, für die bisher wenige oder keine Informationen vorlagen. Die Ergebnisse sind im Anhang 2.7 "Hinweise zum Umweltverhalten Explosivstofftypische Verbindungen" der LfU-Arbeitshilfe zusammengefasst.

#### 3.4.2 Säulenauslaugversuche

#### 3.4.2.1 DRDC-Studie<sup>6</sup>

Mittels Säulenversuchen sollte das Langzeit-Auslaugungsverhalten von angesprengten Mörsergranaten (mit offen liegendem Sprengstoff) auf den Geländeoberflächen untersucht werden. Die offenen Granaten wurden entweder mittels Hohlladung oder durch Splitter einer benachbart zur Detonation gebrachten Mörsergranate erzeugt. Detailinformationen finden sich in [123]. Die Versuche ähneln in ihrer Fragestellung den Versuchen zur Gefährdungsabschätzung von Streugebieten (Anhang 2.4). Je zwei Säulenversuche liefen

- > mit angesprengten Mörsergranaten, die Composition B enthielten,
- » mit Sprengstoff aus den Granaten, der bei der Detonation zerbrochen worden war,
- > und mit zerbrochenem, jedoch "sauberem" Composition B, das nicht einer Detonation ausgesetzt gewesen war.

Die Versuche wurden mit Boden (schluffiger Sand) aus dem Sprenggelände und unter Simulation der örtlichen klimatischen Verhältnisse durchgeführt. Durch Komprimierung der Bewässerungszyklen und Trockenphasen konnten 2 Jahre Exposition durch ein (Versuchs-)-Jahr wiedergeben werden.

Während der anfänglichen Phase der Grundwasserneubildung (dies entspricht der Zeit nach der Schneeschmelze im Frühjahr), konnten die Autoren in den Eluaten hohe Konzentrationen an Sprengstofftypischen Verbindungen nachweisen. Der Verzögerungsfaktor<sup>7</sup> betrug 1,56, der Kd-Wert 0,27 l/kg, berechnet für alle Sprengstoffe (TNT, RDX, HMX) zusammen. Die Wassermenge, die bis zum Durchbruch infiltriert werden musste, war bei den einzelnen Versuchsanordnungen vergleichbar. Die Konzentrationen der TNT-Abbauprodukte lagen um zwei bis drei Größenordnungen unter denen des TNT.

Die Eluatkonzentrationen der Säulen, die offene Munition enthielten, unterschieden sich nicht von den Ablaufkonzentrationen der Säulen, die zerbrochenes Composition B enthielten. Die geringen Mengen an Ruß und Metallbruchstücken, die bei den zerbrochenen Granaten vorhanden waren, beeinflussten die Freisetzung und den Transport der STV folglich nicht.

Obwohl die zerbrochenen Geschoße eine potenzielle Eintragsquelle für Sprengstoffe darstellen, verhindern die relativ geringe Größe der exponierten Sprengstoffoberfläche und der Schutz durch die Geschoßhülle, dass Sprengstoff in relevanten Mengen an dem anfänglichen Schub gelöster Sprengstoffe beteiligt ist. Der Sprengstoff in der Hülle birgt zwar ein langfristiges Gefährdungspotenzial, der Anteil an der zu Elutionsanfang gelösten Sprengstoffmenge ist jedoch gering. Mit dem ersten Eluat wurden bevorzugt die extrem fein verteilten Detonationspartikel gelöst. Nach deren Auflösung bzw. Auswaschung fiel die STV-Konzentration im Auslauf deutlich ab ("drop off").

Beim initialen "Frühjahrs-Ereignis" lösten sich bis zu 1.000 mg Hexogen, 2.200 mg TNT und 48 mg

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Diese Studie ist im PENNINGTON-Bericht nicht näher zitiert.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Dieser Begriff wird nicht näher erläutert.

Oktogen. Die Gesamtmenge an Sprengstoff, die aus dem zerbrochenen Composition B ausgewaschen wurde, (Durchmesser > 0,75 mm) betrug rund 3,2 g. Dies entspricht 7,1 % der ursprünglichen Menge (45 g). Entsprechend der kanadischen Studie, wäre bei gleich bleibender Transportrate die gesamte Ausgangsmenge in 15 Jahren ausgewaschen.

Hier ist zu ergänzen, dass das Material nur vom Oberboden "ausgetragen" wird und natürlich im Untergrund in adsorbierter Form oder im Grundwasser in gelöster Form vorliegt.

Da jedoch anfangs die Feinfraktion bevorzugt gelöst wird, ist nach der anfänglichen Phase mit hoher Frachtrate ein deutlicher Rückgang der mobilisierbaren STV-Mengen zu erwarten, sobald die Feinfraktion ausgespült ist. Dieses Ergebnis bedeutet, dass nennenswerte Mengen der gröberen Fraktion aus Detonationsrückständen auch langfristig in oberflächennahen Böden zu finden sein werden. Dies deckt sich mit den Beobachtungen auf Schießbahnen.



Abb. 20:
Eine der Versuchsanordnungen zur Erzeugung von "cracked shells". Die untere Granate wird zur Detonation gebracht. Splitter durchdringen die Hülle der oberen Granate. Entweder zerbricht ihre Hülle oder die Granate setzt – sekundär initiiert – low-order um.

Es ist anzunehmen, dass sich durch Verwitterungsprozesse aus den groben Brocken wieder ein Feinanteil bilden kann. Die Menge ist von den klimatischen Bedingungen abhängig.

Die kanadische Studie zeigt deutliche Parallelen zu den Versuchen, die im Rahmen der "Gefährdungsabschätzung für Streugebiete" (Anhang 2.4) durchgeführt wurden und bei denen neben "frischem" Material aus dem Feld (im Sinne von verwittertem Sprengstoff aus aufgebrochener Munition) für die Elutionsversuche auch Sprengstoffbrocken aus aufgesägter Munition verwendet wurden. Da die Sprengstoffbrocken bei diesen Versuchen in neutralen, unbelasteten Quarzsand eingebaut wurden, kam hier der Anteil aus der Feinfraktion, die in den US-Versuchen anfangs die hohen Frachtraten erzeugte, nicht zum Tragen. Folglich wurde bei den Versuchen im Rahmen der LfU-Arbeitshilfe nur die Phase nach dem rapiden Konzentrationsabfall erfasst und die Werte waren insgesamt niedriger. Es ist anzunehmen, dass dieser "drop off" im Austrag auf den deutschen Sprengplätzen bereits einige Jahrzehnte zurückliegt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass in der DRDC-Studie mit mehr oder minder "neuem Sprengstoff" gearbeitet wurde. Die Kampfmittel und Sprengstoffbrocken auf deutschen Sprengplätzen sind dagegen mehrere Jahrzehnte alt. Inwieweit mit zunehmendem Alter eine Erhöhung oder Erniedrigung der Löslichkeit resultiert, ist nicht zu prognostizieren.

Die ER-1155-Studie folgert, dass Low-Order-Detonierer aus life fire-Detonationen, sekundärer Initiierung von Blindgängern oder unsachgemäße Vor-Ort-Sprengungen blind gegangener Munition als hauptsächlichen Ein-

tragsherd für Sprengstoffbelastungen auf Schießbahnen anzusehen sind, da im Wesentlichen nur hier hohe Konzentrationen an Sprengstoffen im Boden nachgewiesen werden konnten.

Aus Sicht der LGA ist hierzu anzumerken:

Das Aufsammeln von life fire-Blindgängern ist auf jeden Fall geeignet, einen zusätzlichen Eintrag von Sprengstoffen (durch mögliche sekundäre Low-Order-Initiierung) zu verhindern. Auch das Aufsammeln der erkennbaren Sprengstoffreste (und der Munitionsteile) kann die Einträge von STV in den Untergrund reduzieren.

Ein erheblicher Anteil der Rückstände bei einer Low-Order-Detonation wird jedoch in Form mikroskopisch kleiner Partikel im Umfeld der Verpuffungsstelle verteilt, wie sich im Rahmen der ER 1155-Studie herausgestellt hat. Eine merkliche Reduzierung des Eintrags wäre nur möglich, wenn auch der oberflächennahe Boden im Umfeld jeder Low-Order-Detonation saniert würde.

#### 3.4.2.2 ERDC-Studie<sup>8</sup>

Eine weitere Studie verglich das Auslaugungsverhalten von Rückständen von Composition B, die sich bei Low-Order-Detonationen von Artilleriegranaten gebildet hatten, mit dem Auslaugungsverhalten von RDX-, TNT- und Composition B-dotierten, gesättigten Säulen. Die Ergebnisse wurden mit Verteilungskoeffizienten verglichen, die in batch-Schütteltests ermittelt worden waren; als Böden dienten schluffiger Lehm und lehmiger Sand. Radioaktiv markiertes Hexogen und TNT wurde dem gelösten RDX und TNT der Testlösungen zugegeben.

Die Versuche werden auf Grund ihrer Komplexität hier nicht im Einzelnen vorgestellt sondern nur im Resümee wiedergegeben.

# 3.5 Folgerungen aus dem Projekt ER-1155

Das Autorenteam des Projekts ER-1155 zieht aus den Ergebnissen insgesamt folgende Schlussfolgerrungen:

#### 3.5.1 Charakterisierung der Rückstände auf Schießbahnen

Die Rückstände an Sprengstofftypischen Verbindungen auf Schießbahnen können auf Zielgebiete und Feuerstellungen begrenzt werden. Die übrigen Flächen sind unbelastet. Bei Übungen mit scharfem Schuss verlaufen die meisten Detonationen high-order. Hierbei verbleiben nur minimale Rückstände (10<sup>-3</sup> bis 10<sup>-6</sup> % der ursprünglichen Füllung). Daher tragen High-Order-Detonationen nur unwesentlich zum Gesamtemissionspotenzial einer Schießbahn bei.

Dagegen sind Low-Order-Detonationen der entscheidende Faktor bei der Bildung von Rückständen. Sie können prinzipiell auftreten

- » bei Fehlfunktion verschossener Munition (Fehlfunktionsrate abhängig vom Munitionstyp),
- > bei sekundärer Initiierung von Blindgängern durch Splitter und
- >> durch unsachgemäße Vor-Ort-Sprengung von Blindgängern, wenn die Schlagladung nicht ausreichend dimensioniert wurde.

Die Art der Sprengstofftypischen Verbindungen in den Rückständen hängt von der verwendeten Munition bzw. ihrer Füllung ab.

Bei Low-Order-Detonationen werden die Rückstände in Form makroskopisch sichtbarer Sprengstoffbrocken aber auch in Form mikrokristalliner Partikel im Umfeld der Verpuffungsstellen auf der Gelän-

\_

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Diese Studie ist im Bericht nicht näher zitiert.

deoberfläche verteilt. Nur auf Sprengplätzen finden sich die Rückstände auch tiefer, da das ausgeworfene Material zur Wiederverfüllung der Trichter verwendet wird. Die Entnahme von Oberflächenmischproben allein ist hier nicht ausreichend, die Rückstandsmengen abzuschätzen.

#### 3.5.2 Probenahme

Die heterogene Verteilung der STV erschwert die repräsentative Probenahme und Probenaufbereitung erheblich.

Bei **Handgranatenwurfständen** mit ihrem intensiv durchmischten und kleinräumigen Zielgebiet sind Mischproben aus 30 Einzelproben ausreichend.

Bei **Panzerabwehr-Schießbahnen** für die LAW66 mit ihren hohen und extrem heterogen verteilten Oktol-Rückständen wird die Entnahme von mehr als 30 Einzelproben empfohlen.

Bei den **Feuerstellungen** mit Beprobungsflächen größer 10x10 m sind 50 bis 100 Einzelentnahmen zur Bildung der Mischproben erforderlich.

PENNINGTON et al. schränken ein, dass sich die Beprobung von Bereichen mit **Low-Order- Detonierern** als große Herausforderung erwiesen hat. Die Entnahme von Mischproben aus vielen Einzelentnahmestellen konnte zwar die Repräsentativität gegenüber Einzelproben erheblich steigern, allerdings wurden die Ergebnisse als nicht ausreichend belastbar angesehen.



Abb. 21: Mikroskopische Aufnahme von partikelförmigen Sprengstoffrückständen nach einer Low-Order-Detonation. Die runden Komponenten sind Bröckchen aus Composition B.

Aus diesen Bemerkungen ist zu folgern, das bei extrem heterogener Schadstoffverteilung auch die Entnahme von vielen (kleinen) Einzelproben, das anschließende Mahlen und die Entnahme von 10 g Analysenmenge per Zufallsprinzip aus dem gemahlenen Gut nur eingeschränkt repräsentative Ergebnisse liefert.

Es ist durchaus vorstellbar, das die Schadstoff-Heterogenität auf Sprengplätzen der Heterogenität im Umfeld von Low-Order-Detonationen gleich kommt, da sich die massendetonative Umsetzung von Munition durch hohe Quoten von Low-Order-Umsetzungen auszeichnet. Durch die Rückverfüllung mit belastetem Auswurf stellt sich die Heterogenität bei Sprengtrichtern im Gegensatz zu Schießbahnen zudem dreidimensional dar. Hinweise über den im Rahmen der Arbeitshilfe verfolgten Lösungsansatz finden sich im Schlusskapitel.

#### 3.5.3 Probenaufbereitung

Um die Heterogenität, die Größenverteilung und die Zusammensetzung der Sprengstoff- und Treibmittelpartikel adäquat zu berücksichtigen, haben die Autoren spezielle Vorgehensweisen bei der Probenaufbereitungen und der Entnahme von Teilproben entwickelt. Gegenwärtig werden luftgetrocknete Proben (die gesamte Rohprobe) auf eine Korngröße kleiner 2 mm gesiebt und das Material anschließend mechanisch in einer Kugelmühle gemahlen. Die Mahlzeit beträgt für Böden von Schießbahnen max. (einmalig) 90 s, bzw. 5x60 s für Material, das faserförmige Pulverreste enthalten kann (Feuerstellungen). Zwischen den einminütigen Mahlzeiten lässt man die Probe kurz abkühlen. um eine Entzündung zu vermeiden. Das gemahlene Probengut wird anschließend sorgfältig gemischt, und in einer 1 cm dicken Schicht ausgebreitet. Daraus wird eine 10 g Mischprobe aus mindestens 30 Einzelentnahmestellen gebildet. Diese wird im Ultraschallbad oder in einem Schüttler 18 h mit Acetonitril extrahiert. Die chemische Untersuchung des Extrakts erfolgt gemäß EPA-Vorgaben (8330 HPLC oder 8095 GC-ECD).

Über die Homogenisierung fanden sich in den ausgewerteten deutschen Gutachten keine Angaben.

## 3.5.4 Bodenkonzentrationen

Die Höhe der Bodenbelastungen hängt von der eingesetzten Munition ab. Im Umfeld der Ziele von Artillerieschießbahnen liegen die Konzentrationen an RDX, TNT und HMX üblicherweise zwischen n. n. und max. 1 mg/kg. Im Bereich von Abschussstellungen sind 2,4-DNT und NG in Größenordnungen bis zu 10 mg/kg nachzuweisen. Im Umfeld von Low-Order-Detonierern liegen die Belastungen um drei bis vier Zehnerpotenzen über denen der Ziele. Die Oktogen-Konzentrationen betragen im Umfeld von Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen oft hunderte von mg/kg, während TNT und RDX nur im Bereich weniger mg/kg nachweisbar sind. Im Bereich der Abschussstellungen dieser Bahnen stellt NG die Hauptkontaminante dar. Bis 25 m hinter der Feuerlinie können Konzentrationen an NG von einigen hundert bis einigen tausend mg/kg nachgewiesen werden. Auf Handgranatenwurfständen schwanken die Hexogen-Konzentrationen von < 1 mg/kg bis 50 mg/kg, wobei Low-Order-Detonierer und Rückstände aus der Vor Ort Sprengung von Blindgängern den Haupteintragspfad darstellten.

Neben Sprengstoffen sind im Boden häufig auch Schwermetalle vorhanden. Die Art der Rückstände hängt vom verwendeten Munitionstyp ab. Die Autoren empfehlen, bei der Gefährdungsabschätzung oder bei der Entwicklung von Sanierungskonzepten die Schwermetalle ergänzend zu berücksichtigen.

#### 3.5.5 Grund-/Oberflächenwasser, Sedimente

Sprengstoffkontaminationen traten in Quellen und vereinzelt in Grundwassermessstellen im Abstrom von Zielgebieten von Artillerieschießbahnen und Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen sowie von Bombenabwurf- und Sprengplätzen auf. Hexogen tritt am häufigsten in Oberflächen- und Grundwässern sowie in Sedimenten von Oberflächengewässern auf. Oktogen findet sich vorrangig auf Schießbahnen für Panzerabwehrwaffen. TNT wird meist in niedrigeren Konzentrationen als RDX und nur in wenigen Grundwasseraufschlüssen nachgewiesen. Mit Ausnahme von Sprengplätzen liegen die STV-Konzentrationen im unteren µg/l-Bereich. In Oberflächengewässern konnten bisher nur vereinzelt STV nachgewiesen werden. Die Konzentrationen liegen stets in der Größenordnung von wenigen µg/l.

Trotz der insgesamt eher unkritischen Ergebnisse stellen die Autoren zusammenfassend fest, dass Explosivstoffe mit dem Grundwasser und in geringerem Umfang mit dem Oberflächenwasser aus den Eintragsstellen verfrachtet werden.

In Sprengtrichtern stehendes Wasser kann ebenfalls Sprengstoffe lösen und kommt als weitere Eintragsquelle in Frage.

#### 3.5.6 Vor-Ort-Sprengung

Auf Sprengplätzen werden in der Regel die höchsten Belastungen nachgewiesen. Dies liegt einerseits an der schlechteren Umsetzung von nicht eingehüllten Ladungen, andererseits an Low-Order-Sprengungen. Die Autoren legen daher nahe, bei der Sprengung von Blindgängern ausreichend dimensionierte Schlagladungen zu verwenden, um Low-Order-Detonationen zu vermeiden. Sie empfehlen weiterhin, hierfür munitionsspezifische Anleitungen zu entwickeln.

Zusammenfassend wird empfohlen, Blindgänger, Munitionsteile und Sprengstoffbrocken zu räumen und zu vernichten, sofern es die sicherheitstechnische Lage in den Sprengbereichen zulässt.

### 3.5.7 Transportparameter

Sprengstofftypische Verbindungen zeigen deutliche Unterschiede in ihrem Abbau- und Transportverhalten. Daneben spielen Bodeneigenschaften, wie der Gehalt an organischem Kohlenstoff oder Tonmineralen und deren Kationenaustauschkapazität sowie Niederschlag und Temperatur eine Rolle. Die STV weisen geringe Adsorptionskoeffizienten auf, die Bindung an Bodenpartikel trägt nicht entscheidend zum Rückhalt bei. Die Bestimmung der Adsorptionskoeffizienten wurde bisweilen von Um- und Abbauprozessen überlagert.

Die von festen Sprengstoffbrocken (TNT, RDX und HMX) freisetzbaren Mengen erwiesen sich in den Laborversuchen als relativ hoch. Es war eine Abhängigkeit vom pH-Wert sowie eine Zunahme der Freisetzung bei vergrößerter Oberfläche und erhöhter Temperatur zu beobachten. TNT zeigte die höchste Löslichkeit gefolgt von HMX und RDX. Die freigesetzte Menge verdoppelte sich in etwa alle 10°C. Bei bekanntem Diffusionskoeffizienten und gleichem Partikeldurchmesser ist nach Ansicht der Autoren eine Abschätzung der Freisetzungsraten nach der Levins und Glastonbury-Korrelation möglich. Die tatsächlich auf Schießbahnen vorliegenden Verhältnisse erschweren eine entsprechende Abschätzung jedoch erheblich.

#### 3.5.8 Säulenversuche

Bei den Säulenversuchen stellte sich durch die bevorzugte Auflösung kleiner Partikel zunächst ein Maximalwert bei der Lösungsrate ein, anschließend folgt – so vermuten die Autoren – eine Phase niedrigerer Freisetzung.

RDX wurde bei den Säulenversuchen kaum zurückgehalten. TNT wurde verzögert freigesetzt; die Autoren vermuten als Ursache eine kovalente Bindung des TNT an organischen Kohlenstoff und koplanare Komplexbildung an Tonminerale. Dies erklärt auch, weshalb im Grundwasser häufig RDX vorhanden ist, während TNT fehlt.

TNT und RDX in Mischung als Composition B verhalten sich wie die Einzelstoffe. TNT-Abbauprodukte waren in beiden Versuchsreihen nachweisbar.

# 4 Folgerungen aus dem Projekt ER-1155 für Sprengplätze

Anhand der Erkenntnisse aus den Untersuchungen in den USA lassen sich einige der eingangs gestellten Fragen beantworten:

#### Verbleiben bei einer Sprengung generell Rückstände der Füllung?

Bei der bestimmungsgemäßen Umsetzung von Munition verbleiben ganz offensichtlich nur geringste Rückstände in der Größenordnung von 0,003 % der ursprünglichen Sprengstofffüllung. Dieses Szenario der "High-Order-Detonation nach Verschuss" ist jedoch nicht übertragbar auf Sprengplätze.

Bei der (Einzel-)Sprengung von Munition verbleiben offensichtlich Rückstände in sehr unterschiedlichem Ausmaß im Bereich von wenigen µg bis zu einigen g pro Munition. Sofern ausreichend große Schlagladungen verwendet werden, gelingen High-Order-Umsetzungen und die Rückstandsmenge ist in der Regel gering. Bei unterdimensionierten Schlagladungen findet häufig nur eine unvollständige Umsetzung des Sprengstoffs statt. Im Umgriff der angesprengten Munition verbleiben dabei große Mengen an losem Sprengstoff in gröberer aber auch in fein verteilter Form.

Dies ist bei den Nachkriegssprengplätzen als Hauptproblem anzusehen, da die damals eingesetzten Schlagladungen meist nicht ausreichend dimensioniert waren, um die aufgestapelten Mengen auch nur annähernd umsetzen zu können. Es wurde damals fälschlicherweise davon ausgegangen, dass durch die Entstehung einer Detonationskette die gesamte Munition umgesetzt werden kann. Weiterhin ist anzunehmen, dass z. B. die Verwendung von großkalibriger Munition als Schlagladung, nicht geeignet war, eine hohe Umsetzungsrate zu garantieren. Die Folge waren große Mengen an Blindgängern, die nahezu auf allen Sprengplätzen nachgewiesen wurden. Es ist davon auszugehen, dass eine hohe Blindgängerrate mit einem hohen Prozentsatz an Low-Order-Umsetzungen einhergeht.

Darüber hinaus ist anzunehmen, dass viele Blindgänger, die bei den ersten Sprengungen in den Trichteruntergrund gedrückt worden sind, durch die Nachfolgesprengungen sekundär low-order initiiert wurden. Hierdurch entstanden weitere Kontaminationen.

US-Sprengversuche mit "unconfined charges" deuten darauf hin, dass die Verwendung von nicht eingehüllten Schlagladungen bzw. Iosen Sprengstoffen zu zusätzlichen Kontaminationen führen kann. Die dabei auftretenden geringen Drücke und Temperaturen stellen keine 100%ige Umsetzung des Sprengmittels sicher. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei den Sprengarbeiten nach Kriegsende häufig "loser" Sprengstoff in Form von (gepresstem) TNT verwendet wurde, während in den USA zum Sprengen meist Composition B (Hexogen/TNT) verwendet wird.

Wie die amerikanischen Untersuchungen zeigen, zeichnen sich die Low-Order-Detonationen nicht nur dadurch aus, dass eine große Anzahl an Sprengstoffbrocken und Munitionsteilen mit Sprengstoffanhaftungen entsteht, sondern auch dadurch, dass große Rückstandsmengen an fein verteiltem Sprengstoff freigesetzt werden. Eine Studie der US-Untersuchungen hatte ein Verhältnis von groben Anteilen zu feinen Anteilen von 1/3 zu 2/3 ergeben. Es liegen jedoch keine Erkenntnisse vor, inwieweit eine derartige Verteilung auch auf den deutschen Massenvernichtungsplätzen gegeben ist.

Die zentrale Erkenntnis der US-Studie ist, dass Low-Order-Detonationen die Hauptgefahr für das Grundwasser darstellen. Die Autoren empfehlen deshalb, beim Schießbahnbetrieb kontinuierlich alle visuell erkennbaren Sprengstoffbrocken und die aufgebrochene Munition (sowie die Blindgänger) aufzusammeln. Maßnahmen für die Feinfraktion werden allerdings nicht genannt.

Auf Sprengplätzen geht die Hauptgefahr von den mikrokristallinen Rückständen aus, die bei Low-Order-Detonationen entstehen und zunächst im Umfeld mit dem Auswurf verteilt werden. Ein derartiges Szenario ist auf den Nachkriegssprengplätzen jedoch nicht gegeben, da die vielfache Nutzung der Trichter, die Wiederverfüllung nach Beendigung der Sprengarbeiten und die Erdbewegungen im Zuge der Räumungen die ursprüngliche Verteilung überprägt haben.

Die auf amerikanischen Militäreinrichtungen und im Rahmen dieser Arbeitshilfe durchgeführten Versuche bestätigten, dass Sprengstoff in Form von Sprengstoffbrocken bzw. aus aufgebrochener Munition zu erheblichen Anteilen durch Niederschlagswasser gut mobilisierbar ist. Die Menge, die durch Kontakt mit Niederschlagswasser verfrachtet wird, hängt vom Munitionsbelastungsgrad und der Gesamtgröße der offenen Sprengstoffoberflächen ab. Bei einer Kampfmittel-Räumung oder einer Bodensanierung eines Sprengplatzes sind Sprengstoffbrocken daher unbedingt zu berücksichtigen.

Wie hoch ist der Anteil des nicht umgesetzten Sprengstoffs? Von welchen Randbedingungen z. B. Art, Güte des Sprengstoffs, Munitionstyp, Kaliber oder verwendetem Sprengmittel hängt dieser Anteil ab?

Diese Fragen lassen sich auch nach der Auswertung der US-Literatur nicht abschließend bzw. erschöpfend beantworten.

Wie ausgeführt wurde in den USA Anfang der 80er Jahre erstmals ein Wert von 4 % für die Rückstandsmengen nach dem Sprengen von Munition genannt. Diese Größenordnung wird auch heute noch oft in Fachkreisen zitiert, sie erscheint jedoch aus verschiedenen Gründen als zu hoch: Bei einem durchschnittlichen deutschen Nachkriegssprengplatz sind mit diesem Faktor von 4 %, und den prognostizierten Sprengstoffanteil der vernichteten (sprengstoffgefüllten) Munitionsmengen Bodenkonzentrationen zu erwarten, die ein Vielfaches über den Werten liegen, die üblicherweise auf Sprengplätzen gemessenen werden (n. n. bis wenige mg/kg). Selbst unter Berücksichtigung der heterogenen Verteilung und der Verfrachtung eines wesentlichen Anteils der Sprengstoffrückstände seit Beendigung der Sprengungen liegen die bisher ermittelten Belastungen auf deutschen Sprengplätzen um eine Größenordnung unter den prognostizierten Konzentrationen.

Die US-Sprengversuche ergaben für High-Order-Umsetzungen sehr niedrige Rückstandsmengen von lediglich **0,003** % (einschließlich Schlagladung). Aus verschiedenen Gründen ist jedoch anzunehmen, dass für Nachkriegssprengungen deutlich höhere Rückstandsmengen als 0,003 % angesetzt werden müssen:

- >> Bei den Stapelsprengungen ist von einem sehr hohen Anteil an Low-Order-Umsetzungen auszugehen
- > Der Anteil an Munition mit kleinerem Kaliber war bei den Nachkriegssprengplätzen größer. Entsprechend den Ergebnissen aus den US-Sprengversuchen mit Handgranaten und Antipersonenminen ist anzunehmen, dass gerade die Vernichtung von Munition mit kleineren Kalibern zu höheren Rückstandsmengen geführt hat, als die Vernichtung von Munition mit größeren Kalibern.
- Während des 2.WK wurde Sprengstoff unter großem Druck produziert. Dies hatte ebenso wie die vereinzelt zugesetzten Streckmittel wahrscheinlich einen negativen Einfluss auf die Qualität bzw. das Detonationsvermögen der Sprengstoffe. Der Einfluss der Güte (oder des Alters) eines Sprengstoffs auf die sich bildenden Rückstandsmengen wurde in den US-Untersuchungen nicht geprüft.

Aus diesen Überlegungen ist abzuleiten, dass die Rückstandsmengen, die sich bei den deutschen Massensprengungen gebildet haben, wohl deutlich über 0,003%, jedoch unter 4% liegen. Rückstandsmengen im Bereich von **0,01 bis 1**% der ursprünglichen Sprengstofffüllmenge können als plausibler Wert für die Abschätzung der Gesamt-Emissionsmenge angenommen werden. Für die Massensprengungen durch die Wehrmacht und durch US sind die Rückstandsmengen eher im Bereich von 1% anzusetzen, während für die relativ kontrollierten Sprengungen durch die StEG ein niedrigerer Prozentsatz angenommen werden kann. Eine genauere Abschätzung ist jedoch aufgrund der

unvollständigen Datenlage nicht möglich.

# Wie verteilen sich die Rückstände des Sprengstoffs? Bis in welche Entfernung um die Explosionsstelle sind Sprengstoffe nachweisbar?

Die US-Autoren gehen davon aus, dass der Rußsaum, der sich bei der Sprengung (eines Einzelmunitionsstücks) durch Sauerstoffunterschuss bei der Umsetzung bildet, weitgehend die maximale Erstreckung der Kontaminationen widerspiegelt. Der größte Abstand des Rußsaumes lag bei den US-Sprengungen etwa 10 m vom Detonationspunkt entfernt. Das größte pro Sprengung umgesetzte Netto-Explosivstoffgewicht betrug rund 7 kg. Die bei den US-Sprengungen beobachtbaren Rußsaum-Formen waren sehr unregelmäßig, d. h. es war keine kreisförmige Ausbreitung erkennbar. Bei keinem der Versuche konnte ein Zusammenhang zwischen der Entfernung von Detonationspunkt und der Höhe der Rückstandsmenge festgestellt werden.

Es ist anzunehmen, dass die Flugweite von Brocken (und Mikropartikeln) wegen ihres kleinen Verhältnisses von Gewicht zu Oberfläche sehr begrenzt ist und dass die Verteilung der Sprengstoffrückstände nach den Massensprengungen der Verteilung bzw. Erstreckung des Auswurfs ähnelt. Die Kontaminationen sind daher sehr wahrscheinlich auf den Auswurfbereich begrenzt.

Die Sprengtrichter der Nachkriegszeit wurden in der Regel mehrmals genutzt, so dass die Verteilung der Auswurfmassen bzw. der Rückstände mit Fortdauer der Sprengarbeiten gleichmäßiger wurde. Idealisiert ist davon auszugehen, dass sich nach Mehrfachnutzung eine annähernd kreisförmige Verteilung eingestellt hat.

Das umgesetzte Netto-Explosivstoffgewicht war bei den Massensprengungen nach dem 2.WK wesentlich größer als bei den US-Versuchen. Teilweise wurden pro Sprengung mehrere Tonnen Munition auf einmal umgesetzt. Die in den Trichtern eingerichteten Stapel wurden jedoch mit geringeren Verzögerungen gezündet, um die Drücke zu minimieren.

Daraus ist abzuleiten, dass sich die Rückstände bzw. die Auswurfmassen über eine größere Distanz als 10 m vom Detonationspunkt verteilt haben. Luftbilder aus der Zeit nach Beendigung der Sprengarbeiten lassen auf vielen Sprengplätzen andererseits erkennen, dass die Auswurfbereiche 40 m selten überschreiten.

Für die Beprobung des Auswurfbereichs scheint daher folgende Vorgehensweise sinnvoll:

Bei üblichen Sprengtrichtern mit rund 10 - 15 m Durchmesser erscheint ein Probenahmesektor mit einem Radius (gemessen ab Trichter- oder Sprengfeldrand) von ca. 20 m als ausreichend. Bei größeren Trichtern wird die Beprobung einer zweiten Zone von 20 bis 50 m ab Trichterrand empfohlen.

Es ist anzumerken, dass landwirtschaftliche Nachnutzungen zu einer weiteren nachträglichen Verteilung der Rückstände geführt haben können. Dies ist ggf. in der Probenahmestrategie dahingehend zu berücksichtigen, dass der Radius der Beprobungsbereiche auf 30 m erhöht oder zwei Beprobungszonen gebildet werden.

#### In welcher Form bzw. Korngröße liegen die Rückstände vor?

Da auf Nachkriegssprengplätzen mit einem hohen Anteil an Low-Order-Detonationen gerechnet werden muss, sind auch sehr unterschiedliche Korngrößen der Rückstände anzunehmen. Das gesamte Größenspektrum von Mikropartikeln bis hin zu Brocken mit Kantenlänge von mehreren Zentimetern ist prinzipiell zu erwarten.

Wurden Kartuschen, patronierte Munition, oder Munition kleinen Kalibers zusammen mit großkalibriger Munition vernichtet, ist davon auszugehen, dass auch bei einer bestimmungsgemäßen Deflagra-

tion des Pulvers neben fein verteilten Rückständen auch Pulverrückstände in Partikelform verblieben sind. Hierauf weisen die US-Untersuchungen sowie die Auswertung der deutschen Gutachten hin. Im Rahmen der Gefährdungsabschätzung ist zu berücksichtigen, in welcher Form die pulvertypischen Parameter 2,4-DNT, NG, DEGDN und NQ vorliegen. Bei Partikeln sind die Verbindungen an NC gebunden. In diesem Fall ist die Mobilisierbarkeit vernachlässigbar gering [220].

#### Bilden sich andere umweltrelevante Detonationsprodukte?

Mit dieser Fragestellung hat sich das Projekt ER 1155 nicht direkt beschäftigt. In [431] sind jedoch die Ergebnisse eines Screenings dargestellt. Hierdurch sollte geklärt werden, ob auf Schießbahnen (außer Explosivstoffen) weitere Verbindungen von Relevanz sind. Die Bodenuntersuchungen umfassten 71 organische Verbindungen. Nur acht dieser Verbindungen wurden in Bodenproben nachgewiesen. Nach ihrer Häufigkeit waren dies:

- Bis(2-ethylhexyl)phthalat, Isophoron, Diethylphthalat und Benzo(a)anthracen (jeweils nur ein Mal nachgewiesen)
- N-Nitrosodiphenylamin, Chrysen, Benzoesäure (drei Mal nachgewiesen) und
- Dibutylphthalat) (sieben Mal nachgewiesen).

Andere Verbindungen traten auf Schießbahnen folglich nur sehr untergeordnet auf. Bei den Phthalaten und dem N-nitroso-diphenylamine handelt es sich um Pulverzusatzstoffe bzw. deren Abbauprodukte. Phthalate werden zum Teil in Untersuchungskonzepten von Sprengplätzen bereits berücksichtigt. PAK kommen heute nahezu ubiquitär vor. Somit liegen derzeit keine Hinweise vor, dass auf Sprengplätzen mit zusätzlichen Parametern zu rechnen ist, die durch den üblichen Parameterumfang nicht abgedeckt sind.

# Sind die Verhältnisse bei der "Sprengung von Munition" auf die Verhältnisse der "Sprengung von Treibmitteln" übertragbar?

Im Rahmen des US-Großprojekts wurden vorrangig die Pulverrückstände bei bestimmungsgemäßem Einsatz (Kontaminationen an Feuerstellungen) überprüft. Lediglich WALSH, M. R. et al. 2006 [210] analysierte NG-Rückstände nach Abbrand losen Pulvers. Hierbei wurden 1,6% der ursprünglichen Menge als Rückstand ermittelt. Eine "Sprengung" von munitioniertem Pulver, so wie nach dem 2. WK vielerorts üblich, wurde nicht simuliert.

Infanteriemunition und Kartuschen ließen sich nach dem 2.WK sprengtechnisch kaum vernichten. Daher wurde dieses Verfahren von US-Truppen auch nur im Sinne einer "Unbrauchbarmachung" praktiziert. Prinzipiell sind drei Folgeszenarios möglich:

- die Patrone/Kartusche brennt aus. In diesem Fall verbleiben Rückstände, die von der Größenordnung vermutlich mit denen der bestimmungsgemäßen Anwendung vergleichbar sind. Bei den Rückständen kann es sich zum Teil auch um un- oder halbverbrannte Pulverfasern handeln. Je nach eingesetztem Treibmittel sind hier die Parameter NG, DEGDN und NQ (mehrbasige Pulver) oder 2,4-DNT (einbasiges Pulver) relevant.
- die Patrone / Kartusche bleibt unversehrt. In diesem Fall ist zunächst mit keiner Freisetzung des Treibmittels zu rechnen.
- die Patrone / Kartusche wird aufgerissen. In diesem Fall kann das Pulver, das im Regelfall aus einzelnen Partikeln (z. B. Blättchen) besteht, aus der Patrone herausfallen.



Abb. 22: Loses Blättchenpulver im Aushubmaterial eines Trichters (ehem. US-Sprengplatz).

Aus vorgenannten Gründen ist es nicht möglich für die nach Sprengungen verbliebenen Treibmittelrückstände einen Prozentsatz anzugeben.

Bei den US-Untersuchungen konnten im Umfeld von (aktiven) Feuerstellungen (Artillerie und Panzer) Belastungen im Boden nachgewiesen werden. Sie lagen offensichtlich zum Teil auch in Form von unoder halbverbrannten Pulverfasern vor. In diesen Fällen waren höhere Konzentrationen der relevanten Parameter messbar.

Gegenüber den Sprengungen nach dem 2.WK besteht jedoch ein gravierender Unterschied: Die amerikanischen Schießbahnen sind in Nutzung. Die Kontaminationen sind "frisch". Seit den Munitionsvernichtungen nach dem Krieg sind jedoch mittlerweile 60 Jahre vergangen. Angesichts der hohen Löslichkeit von NG (2.000 mg/l) und der hohen Austragsmengen, die die amerikanischen Untersuchungen ergaben, wäre anzunehmen, dass diese Verbindung heute im Boden nicht mehr nachzuweisen ist. Die Auswertung der deutschen Gutachten ergab jedoch, dass NG und DNT in Bodenproben von Sprengplätzen immer noch nachgewiesen werden. Es ist anzunehmen, dass dies auf kleine Partikel von Treibmitteln (Pulverfasern) in der Analysemengezurückzuführen ist. US-Untersuchungen zeigen, dass NG und DNT in diesen Fällen nur sehr untergeordnet löslich sind, da sie in der NC-Matrix eingebunden sind. Die Grundwassergefährdung durch Pulverreste ist somit eher als gering anzusehen. Diese Annahme wird durch Untersuchungen gestützt, die im Rahmen des Anhangs 2.3 "Vergleich von Untersuchungsmethoden" durchgeführt wurden. Hier wurden Böden eluiert, die zum Teil Kartuschreste bzw. Pulverreste enthielten. Pulvertypische Verbindungen waren in den Eluaten nicht festzustellen.

#### Allgemeine Schlussfolgerungen

Auf vielen amerikanischen Schießbahnen dominiert Munition, die mit Composition B gefüllt ist. Im Grundwasser dieser Bahnen ist in der Regel Hexogen der zentrale Schadstoffparameter, während TNT nicht nachgewiesen wurde. Hierfür ist das unterschiedliche stoffliche Verhalten verantwortlich.

Eine ähnliche Situation ist auf deutschen Sprengplätzen gegeben: Auch hier wird in der Regel Hexogen als Hauptschadstoffparameter im Grundwasser identifiziert. Die Herkunft des Hexogens ist schwer zu erklären, da es nur in Spezialmunition Verwendung fand, die auf Sprengplätzen eher selten auftritt. Möglicherweise liegt der Ursprung in der Verwendung von RDX-haltigen Schlagladungen bei den Sprengungen oder in der zusätzlichen Vernichtung nicht mehr benötigter amerikanischer Munitionsbestände.

Die US-Untersuchungen zeigen deutlich, dass die Schadstoffe auf Übungsplätzen extrem heterogen im Boden verteilt sind. Dieses Szenario ist uneingeschränkt auf die Nachkriegssprengplätze übertragbar. Wie auf Schießbahnen versagen auch auf Sprengplätzen konventionelle Beprobungstechniken.

Im Hinblick auf die geschilderte Heterogenität wurden in den USA angepasste Untersuchungsstrategien entwickelt, die sich zum Teil erheblich von den in Deutschland angewandten Methoden unterscheiden. Zum einen werden die Proben gemahlen und ein spezielles Vorgehen bei der Mischprobenbildung im Labor stellt die Repräsentativität der Analysenmenge sicher. Als Extraktionsmittel kam bisher Acetonitril, alternativ auch Methanol zur Anwendung.

Die amerikanische Vorgehensweise scheint jedoch bei der Erkundung von Low-Order-Detonationsstellen an ihre Grenzen zu stoßen; hier wurden keine ausreichend belastbaren Ergebnisse erzielt.

Das Verteilungsschema auf deutschen Nachkriegssprengplätzen ähnelt sehr wahrscheinlich dem Low-Order-Szenario.

Im Rahmen des Projekts ER-1155 wurden keine Eluatversuche durchgeführt. Auch Grundwasser wurde auf US-Schießbahnen bisher kaum untersucht. Ausbreitungsmodelle bzw. Frachtbetrachtungen auf Schießbahnen erweisen sich offensichtlich als schwierig, da die Freisetzungsraten, die im Labor ermittelt wurden, nur mit erheblichen Unsicherheiten auf die Verhältnisse im Gelände übertragbar sind. Aussagefähige Ergebnisse, die für Frachtbetrachtungen oder Sickerwasserprognosen im Rahmen der hier erstellten Arbeitshilfe verwertbar gewesen wären, waren in der US-Studie nicht enthalten.

# 5 Fehlerbetrachtung

Die systematischen Untersuchungen der ER-1155-Studie machen einen wissenschaftlich neutralen Eindruck. Die Schlussfolgerungen halten wir für uneingeschränkt belastbar und plausibel.

Begriffliche Fehlinterpretationen sind bei der Übersetzung der teilweise schwer verständlichen Berichte vom Englischen ins Deutsche nicht auszuschließen, da selbst in deutscher Literatur Fachtermini nicht immer richtig angewendet werden.

# Bildnachweis:

[389] http://www.serdp.org/Research/er-energetics.cfm	Seite 11 oben
[390] http://el.erdc.usace.army.mil/index.cfm	Seite 11 unten link
[391] http://www.crrel.usace.army.mil/	Seite 11 unten rechts
[207] JENKINS, Th. F. et al. (2006): Sampling studies at an Air Force live-fire bombing range impact area. ERDC/CRREL TR- <b>06-2</b>	Seite 17
[108] JENKINS, Th. F. et al. (2001): Characterization of explosives contamination at Military firing ranges. ERDC TR- <b>01-05</b> (ERDC/CRREL MP-01-5729)	Seite 19
[392] http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/m67.htm (Federation of American Scientists (FAS); FAS Launches Online Chemical Weapons Archive	Seite 20
SCHWENDNER, A.	Seite 21 oben Seite 27 Seite 36 Seite 39 unten Seite 57
[393] www.waffenhq.de	Seite 21 unten
[394] PENNINGTON, J. C. et al. (2001): Distribution and fate of energetics on DoD test and training ranges: interim report 1. ERDC TR-01-13	Seite 24
[208] PENNINGTON, J. et al. (2006): Distribution and fate of energetics on DoD test and training ranges: final report. ERDC TR-06-13	Seite 25 Seite 28
[395] PENNINGTON, J. C. et al. (2001): Distribution and fate of energetics on DoD test and training ranges: interim report 1. ERDC TR-01-13	Seite 39 oben
[215] DUBÉ, P. et. al. (2004): Study of the Environmental Impacts of the Blow-in-Place Procedure of Various Explosives, Munitions and Charges. – Defence R & D Canada Valcartier. TR 2003-370	Seite 40
[128] WALSH, M. R. et al. (2005): An examination of protocols for the collection of munitions-derived explosives residues on snow-covered ice. ERDC/CRREL TR-05-8	Seite 43
[396] http://fas.org/man/dod-101/sys/land/m18- claymore.htm (Federation of American Scientists (FAS); FAS Launches Online Chemical Weapons Archive	Seite 44 oben
[397] <a href="http://www.historyofwar.org/articles/weapons_bangalore.h">http://www.historyofwar.org/articles/weapons_bangalore.h</a> <a href="mailto:tml">tml</a>	Seite 44 unten
[123] PENNINGTON, J. C. et al. (2005): Distribution and fate of energetics on DoD test and training ranges. Interim Report <b>5</b> . ERDC/CRREL TR-05-2.	Seite 48 Seite 50

